



David Frutuoso Lourenço

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de um Novo Padrão Gravimétrico de Medição de Caudal de Fluidos até 28 m³/h

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira
Martins, Professor Auxiliar, FCT/UNL-DEMI

Co-orientador: Mestre Elsa Maria Isqueiro Batista, Responsável do
laboratório de Volume, Instituto Português da
Qualidade

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Vicente Fradinho, Professor
Auxiliar, FCT-UNL

Arguentes: Prof. Doutor Luis Miguel Chagas Costa Gil, Professor
Auxiliar, FCT-UNL
Doutor Olivier Alain Gérard Penedo Pellegrino,
Responsável do laboratório de Fotometria e Radiometria,
Instituto Português da Qualidade

Vogal: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Auxiliar, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2018

Desenvolvimento de um Novo Padrão Gravimétrico de Medição de Caudal de Fluidos até 28 m³/h

Copyright, 2018, David Frutuoso Lourenço, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a todos os docentes que contribuíram para a minha formação académica.

Ao Professor Rui Fernando Martins, da FCT-UNL/DEMI, meu orientador, pela oportunidade de estágio no IPQ, pela sua total disponibilidade, orientação e aconselhamento na dissertação.

À Dra. Elsa Batista, do IPQ, por me ter acompanhado e ajudado na minha primeira experiência profissional, pelo seu conhecimento e contributo para o tema. A sua cooperação foi fundamental para o desenvolvimento do projeto.

Ao Mário Condeço, pelo conhecimento que me transmitiu e pela sua boa disposição em trabalho. Agradeço também a todos os que, de alguma forma, me ajudaram durante a minha passagem pelo IPQ.

Aos meus amigos de faculdade, pela família que fomos, e pelos anos inesquecíveis que passámos.

Aos amigos de infância, que estiveram sempre presentes.

À minha namorada, Maria Teresa Barreto, pelo apoio, incentivo e carinho.

Aos meus pais, Joaquim Maria e Lúcia, e irmão, João, por tudo, eternamente grato.

Resumo

O IPQ, enquanto Instituição Nacional de Metrologia, desenvolveu através do seu Laboratório de Volume e Caudal (LVC), em parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT-UNL, o projeto de um novo Banco de Ensaio para calibração de caudalímetros e contadores de água, para caudais até $28 \text{ m}^3/\text{h}$, pelo procedimento “Flying-start-and-finish” estático, utilizando o método gravimétrico.

Este trabalho utilizou conceitos do projeto axiomático e começou pela fase de identificação e de especificação dos requisitos funcionais necessários para a conceção do sistema de medição; posteriormente, a estrutura de todo o Banco de Ensaio foi idealizada e modelada, foram feitos os cálculos necessários para a conceção da instalação hidráulica e, na fase final, foram elaborados os desenhos técnicos do projeto. Paralelamente, foram orçamentados os componentes que permitem satisfazer as condições do projeto.

Tendo como base o modelo matemático, procedeu-se à identificação e determinação das respetivas componentes de incertezas associadas à medição de caudal pelo método gravimétrico. A metodologia utilizada segue o descrito no *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM). Foi também descrito o procedimento experimental onde se referem as condições de referência e o modo operativo.

Palavras-chave: Banco de Ensaio, Caudalímetro, Calibração, Incerteza, Medição de caudal, Método gravimétrico

Abstract

The IPQ, as Measurement Nacional Institute, has developed by its Laboratory of Volume and Flow (LVC), in partnership with Department of Mechanical and Industrial Engineering (DEMI) of FCT-UNL, the design of a new Test Bench for calibration of flow meters and water meters for flow rates up to 28 m³/h by the static Flying-start-and-finish procedure, using the gravimetric method.

This work used concepts of axiomatic design and began by identifying and specifying the functional requirements necessary for the design of the measurement system; afterwards, the structure of the whole Test Bench was designed and modeled, the necessary calculations were made for the design of the hydraulic installation, and in the final phase, the technical drawings of the project were elaborated. In parallel, the components that allow the fulfillment of the project conditions have been budgeted.

Based on the mathematical model, the respective uncertainty components associated with the gravimetric flow measurement were identified and determined. The methodology used follows the *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM). It was also described the experimental procedure where are referred the reference conditions and the operative mode.

Key words: Test Bench, Flowmeter, Calibration, Uncertainty, Flow measurement, Gravimetric method

Índice

Agradecimentos	III
Resumo	V
Abstract	VII
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tabelas	XVII
Siglas e Acrónimos	XIX
Simbologia	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Estrutura da dissertação	2
2. ENQUADRAMENTO	5
2.1. Metrologia	5
2.2. Categorias da Metrologia	6
2.3. Instituto Português da Qualidade (IPQ)	6
2.4. Laboratório de Volume e Caudal (LVC)	8
2.5. Termos e Definições Metrológicas Utilizadas	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1. Método Gravimétrico	11
3.1.1. Método “Standing Start-and-Stop” (SSS)	11
3.1.2. Método “Flying-Start-and-Finish” (FSF)	11
3.1.3. Método de Pesagem Estático	12
3.1.4. Método de Pesagem Dinâmico	12
3.1.1. Cálculo do Volume	12
3.1.2. Cálculo do Caudal	13
3.2. Teoria e Metodologias de Projeto	14
3.2.1. Teoria	14
3.2.2. Metodologia	14
3.2.3 Projeto de Engenharia	15

3.2.4. Projeto Axiomático.....	15
3.3. Normalização.....	20
3.3.1. Norma ISO 4064-1 <i>Water Meters for Cold Potable Water and Hot Water – Metrological and Technical Requirements</i>	20
3.3.2. Norma ISO 4064-2 - <i>Measurement of Water Flow in Closed Conduits – Meters for Cold Potable Water</i>	20
3.3.3. Norma ISO 4064-3 - <i>Measurement of Water Flow in Closed Conduits – Meters for Cold Potable Water</i>	21
3.3.4. Norma ISO 4185 - <i>Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits – Weighing Method</i>	21
3.3.5. Norma NP 2938 - Contadores de Água Limpa, para Uso Doméstico, Comercial ou da Indústria Ligeira; Verificações Metrológicas	22
3.3.6. Norma NP 4360 - Contadores de Água Potável Fria; Caudalímetros Eletromagnéticos. Terminologia, Definições, Características Tecnológicas e Características Metrológicas.....	22
3.4. Pesquisa Bibliográfica	22
3.4.1. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil	22
3.4.2. NIST's Fully Dynamic Gravimetric Liquid Flowmeter Standard	23
3.4.3. EURAMET Project No. 1046 Inter-comparison of Water Flow Standards Using Electromagnetic Flowmeters	24
3.5. Caracterização de Contadores e Caudalímetros	26
3.5.1. Contador.....	26
3.5.2. Caudalímetro	27
4. CONCEÇÃO E PROJETO DO PADRÃO.....	29
4.1. Identificação e Contextualização da Necessidade	29
4.2. Requisitos Funcionais de Projeto.....	30
4.2.1. Operar numa Ampla Gama de Caudal.....	32
4.2.2. Universalizar o Banco de Ensaio.....	34
4.2.3. Medições Experimentais.....	35
4.3. Constrangimentos Funcionais de Projeto	36
4.3.1. Constrangimento Técnico.....	36

4.3.2. Constrangimento Financeiro	36
4.3.3. Constrangimento Temporal.....	36
4.3.4. Constrangimento Dimensional	36
4.4. Parâmetros de Projeto.....	39
4.4.1. Operar numa Ampla Gama de Caudal.....	40
4.4.2. Universalizar o Banco de Ensaio.....	51
4.4.3. Medições Experimentais.....	53
4.5. Composição Modular do Projeto	56
4.6. Dimensionamento e Cálculos	63
4.6.1. Tubagem	63
4.6.2. Bomba Centrífuga para Geração de Caudal.....	74
4.6.3. Tempo de Enchimento	85
4.6.4. Orçamentos.....	86
5. CÁLCULO DE INCERTEZAS	87
5.1. Incerteza de Medição.....	88
5.2. Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada	88
5.2.1. Avaliação Tipo A da Incerteza-Padrão.....	89
5.2.2. Avaliação tipo B da Incerteza-Padrão	89
5.3. Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída.....	92
5.4. Incerteza de Medição Expandida.....	93
5.5. Determinação da Incerteza de Medição do Caudal no Padrão pelo Método Gravimétrico	94
5.5.1. Parâmetros que Influenciam a Medição	94
5.5.2. Modelo de Cálculo	95
5.5.3. Incertezas Padrão	97
5.5.4. Coeficientes de Sensibilidade	101
5.5.5. Incerteza Combinada.....	102
5.5.6. Incerteza Expandida	102
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	105

6.1. Calibração de Contadores/Caudalímetros pelo Método <i>Flying-Start-and-Finish</i> Estático [12]	105
6.1.1. Material	105
6.1.2. Condições de Referência	106
6.1.3. Modo Operatório	107
6.1.4. Procedimento Experimental da Calibração de Contadores/Caudalímetros pelo Método <i>Flying-Start-and-Finish</i> Estático.....	108
7. CONCLUSÃO	111
BIBLIOGRAFIA.....	115
ANEXOS	121
Anexo I – Massa Volúmica da Água e do Ar	123
Anexo II – Ferramentas de Cálculo de Dinâmica de Fluídos e Soldadura	125
Anexo III – Dimensões dos Acessórios de Catálogo.....	129
Anexo IV – Diferentes Estágios de Conceção ao Longo do Tempo	145
Anexo V – Desenhos de Construção Mecânica.....	149

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura Organizacional do IPQ.....	7
Figura 2.2 - Estrutura Orgânica da Unidade de Laboratório Nacional de Metrologia	8
Figura 2.3 - Laboratório de pequenos volumes e de micro caudal.....	9
Figura 2.4 - Laboratório de médios e grandes volumes.	9
Figura 3.1 - O processo do projeto visto como um mapeamento através dos 4 domínios	15
Figura 3.2 - Matrizes de Projeto.....	17
Figura 3.3 - Cálculo da probabilidade de sucesso de um DP satisfazer o FR	18
Figura 3.4 - Caminho em zigzag para uma decomposição hierárquica.....	19
Figura 3.5 - Instalação de calibração em caudal situada no LNEC.....	23
Figura 3.6 - Instalação de calibração em caudal situada no NIST	24
Figura 3.7 - Instalação de calibração em caudal situada no MKEH	25
Figura 3.8 - Instalação de calibração em caudal situada no BOM	26
Figura 3.9 - Contadores Multi-jato MST e Contador Woltmann MEISTREAM.....	27
Figura 4.1 - Hierarquização e avanço em zigzag do Domínio funcional e físico.....	31
Figura 4.2 - Matriz Projeto.....	32
Figura 4.3 - Reservatórios Padrão de 1000 litros e 200 litros	37
Figura 4.4 - Plataforma metálica para colocação de reservatórios Padrão.....	38
Figura 4.5 - Planta da zona de implementação do Banco de Ensaio.....	38
Figura 4.6 - Zona onde se fará a instalação do Banco de Ensaio	39
Figura 4.7 - Bomba centrífuga	41
Figura 4.8 - Válvula de globo.....	42
Figura 4.9 - Válvula de diafragma	42
Figura 4.10 - Vista em corte de uma válvula de diafragma	43
Figura 4.11 - Válvula de agulha	43
Figura 4.12 - Vista em corte de uma válvula de agulha	44
Figura 4.13 - Caudalímetro eletromagnético.....	44
Figura 4.14 - Caudalímetro mecânico (rotâmetro).....	46
Figura 4.15 - Sensor de pressão	47
Figura 4.16 - Espessuras comerciais de tubos (ASTM)	48
Figura 4.17 - Filtro	49
Figura 4.18 - Válvulas de 3 vias com atuador pneumático	50
Figura 4.19 - Funcionamento de válvula de 3 vias T	50
Figura 4.20 - Reservatório IBC 1000L.....	51
Figura 4.21 - Acessório de extensão	52

Figura 4.22 - Dimensionamento de tomadas de pressão	53
Figura 4.23 - Balança	54
Figura 4.24 - Cronómetro.....	55
Figura 4.25 - Esquema instalação para calibração por pesagem - fornecimento por bombagem	56
Figura 4.26 - Modelação do Banco de Ensaio completo.....	57
Figura 4.27 - Zona de bypass à bomba centrífuga	57
Figura 4.28 - Zona de filtro e visor de escoamento.....	58
Figura 4.29 - Zona DUT- DN80.....	58
Figura 4.30 - Zona DUT- Substituição de troços	59
Figura 4.31 - Zona DUT- DN25.....	59
Figura 4.32 - Zona de leitura e regulação de caudal	60
Figura 4.33 - Zona de comutação de escoamento	60
Figura 4.34 - Zona de pesagem	61
Figura 4.35 - Fases de gooseneck.....	62
Figura 4.36 - BE e estrutura metálica.....	62
Figura 4.37 - Terceiro reservatório com escoamento por gravidade.....	63
Figura 4.38 - Secção longitudinal de tubo.....	64
Figura 4.39 - Secção longitudinal de tubo com redução	68
Figura 4.40 - Dimensões de tubagem.....	68
Figura 4.41 - Funcionamento da ligação roscada.....	71
Figura 4.42 - Ligação roscada- cotas de montagem	72
Figura 4.43 - Funcionamento da ligação flangeada	73
Figura 4.44 - Espaçamento máximo entre suportes de tubagem em aço.....	73
Figura 4.45 - Curva característica da bomba <i>Waukesha Cherry-Burrell SPX – Flow</i>	76
Figura 4.46 - Esquema Hidráulico	77
Figura 4.47 - Ponto de funcionamento da instalação	81
Figura 4.48 - Tempo de enchimento do reservatório de recolha.....	85
Figura 4.49 - Orçamento de material a comprar	86
Figura 5.1 - Distribuição normal	90
Figura 5.2 - Distribuição retangular	91
Figura 5.3 - Distribuição triangular.....	92
Figura 6.1 - Esquema de procedimento experimental.....	105
Figura II.1 - Tipos de junta e sua eficiência	125
Figura II.2 - Simbologia de esquema hidráulico	125
Figura II.3 - Coeficientes de perda de carga singular.....	126
Figura II.4 - Coeficientes de perda de carga singular (continuação).....	127

Figura II.5 - Diagrama de Moody	127
Figura III.1 - Dimensões da bomba centrífuga.....	129
Figura III.2 - Dimensões da válvula de diafragma	130
Figura III.3 - Dimensão do corpo da válvula de diafragma	130
Figura III.4 - Dimensão do diafragma da válvula	131
Figura III.5 - Dimensões da válvula de globo	132
Figura III.6 - Dimensões do Filtro Y.....	133
Figura III.7 - Dimensões do caudalímetro electromagnético	133
Figura III.8 - Dimensões dos rotâmetros.....	134
Figura III.9 - Dimensões da válvula de retenção.....	134
Figura III.10 - Dimensões da válvula de agulha	135
Figura III.11 - Dimensões da válvula de segurança	135
Figura III.12 - Dimensões da junta extensível	136
Figura III.13 - Dimensões do visor de escoamento.....	136
Figura III.14 - Dimensões da válvula de 3 vias de 1 1/4"	137
Figura III.15 - Dimensões da válvula de 3 vias de 3"	137
Figura III.16 - Dimensões da torneira de bica.....	138
Figura III.17 - Dimensões do atuador GNP	139
Figura III.18 - União à bomba - União DIN.....	140
Figura III.19 - Dimensões da Curva 90°.....	141
Figura III.20 - Dimensão joelho 90° roscado	141
Figura III.21 - Dimensões do casquilho duplo sextavado	142
Figura III.22 - Dimensões do casquilho duplo redução	142
Figura III. 23 - Dimensão do Tê.....	143
Figura III.24 - Dimensão de união de cruzamento	143
Figura III.25 - Dimensões da válvula de esfera.....	144
Figura III.26 - Dimensões das Abraçadeiras	144
Figura IV.1 - Primeira conceção do projeto	145
Figura IV.2 - Segunda conceção do projeto	146
Figura IV.3 - Terceira conceção do projeto	146
Figura IV.4 - Conceção Final (1)	146
Figura IV.5 - Conceção Final (2)	147
Figura IV.6 - Conceção Final (3)	147
Figura IV.7 - Conceção Final (4)	148
Figura IV. 8 - Conceção Final e Plataforma metálica	148

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Comprimentos de DUT possíveis de instalar.....	52
Tabela 4.2 - Comprimento do troço reto	53
Tabela 4.3 - Propriedades técnicas da balança	54
Tabela 4.4 - Comprimentos do troço $A - B - D - (E)_I - F$	78
Tabela 4.5 - Coeficientes de perda de carga singular do troço $A - B - D - (E)_I - F$	78
Tabela 4.6 - Rugosidade relativa.....	79
Tabela 4.7 - Cálculo do Número de Reynolds para os tubos DN40, DN50 e DN80.	79
Tabela 4.8 - Valores de f retirados do diagrama de Moody	79
Tabela 4.9 - Comprimentos do troço de aspiração	82
Tabela 4.10 - Coeficientes de perda de carga singular do troço de aspiração	82
Tabela 5.1 - Relação graus de liberdade efetivos e fator de expansão	94
Tabela 5.2 - Fontes de incerteza associadas ao modelo de cálculo (Parte 1)	96
Tabela 5.3 - Fontes de incerteza associadas ao modelo de cálculo (Parte 2)	97

Siglas e Acrónimos

AD – (*Axiomatic Design*) Projeto Axiomático

AISI - *American Iron and Steel Institute*

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BE – Banco de Ensaio

BEV - *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (The National Metrology Institute of Austria)*

BIPM - *Bureau International des Poids et Mesures*

BOM - *Bureau of Metrology (The National Metrology Institute of Republic of Macedonia)*

BSP - *British Standard Pipe*

CETIAT - *Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques*

CMI - *Czech Metrology Institute (The National Metrology Institute of Czech Republic)*

CN's - Necessidades do cliente

C's - Constrangimentos

DEMI - Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

DMET – Departamento de Metrologia

DP's - Parâmetros de Projeto

DUT – (*Device under test*) Dispositivo em teste

EIM - *Hellenic Institute of Metrology (the National Metrology Institute of Greece)*

EN - *European Standards*

EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres

EURAMET - *European Association of National Metrology Institutes*

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologias

FR's - Requisitos Funcionais

FSF - *Flying-start-and-finish*

GUM - *Guide to the expression of uncertainty in measurement - Evaluation of measurement data*

IBC - *Intermediate Bulk Container*

IMBH - *Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina (The National Metrology Institute of Bosnia and Herzegovina)*

INRIM – *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (The National Metrology Institute of Italy)*

IPAC - Instituto Português de Acreditação

IPQ - Instituto Português da Qualidade

ISO - *International Organization for Standardization*

JV (Justervesenet) - *Norwegian Metrology Service (The National Metrology Institute of Norway)*

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

LFS - *Liquid Flow Standard*

LNE - *Laboratoire national de métrologie et d'essais*

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNM - Laboratórios Nacionais de Metrologia

LNMC - *Latvian National Metrology Centre*

LVC - Laboratório de Volume e Caudal

MEE - Ministério da Economia e do Emprego

METAS - *Federal Institute of Metrology (Swiss National Metrology Institute)*

MKEH - *Hungarian Trade Licensing Office (The National Metrology Institute of Hungary)*

NIST - *National Institute of Standards and Technology (The National Metrology Institute of USA)*

NP - Normas Portuguesas

NPSHR - *Net Positive Suction Head (Required)*

OIML - *International Organization of Legal Metrology*

PID - *Proportional-Integral-Derivate*

PTB - *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (The National Metrology Institute of Germany)*

PV's - Variáveis de Processo

RESOPRE - Sociedade Revendedora de Aparelhos de Precisão

RIQUA - Rede de Investigadores da Qualidade

SMU - *Slovensky Metrologicky Ustav (The National Metrology Institute of Slovakia)*

SPQ - Sistema Português de Qualidade

SSS - *Standing Start-and-Stop*

ULMN - Unidade de Laboratório Nacional de Metrologia

UNL - Universidade Nova de Lisboa

VMT / LEI - *State Metrology Service / Lithuanian Energy Institute*

VSL - *Dutch Metrology Institute (The National Metrology Institute of the Netherlands)*

Simbologia

$\alpha_{\text{água}}$	Coeficiente de expansão térmica da água
α_{tubo}	Coeficiente de expansão térmica do material da tubagem
ΔH_{MJ}	Perda de carga no troço
$\Delta h, H$	Diferença de alturas piezométricas
ΔT	Diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura de referência
ΔV	Variação de volume no tubo
$\delta V_{\text{evap}}, \delta Q_{\text{evap}}$	Correção associada à evaporação
$\delta V_{\text{def}}, \delta Q_{\text{def}}$	Correção associada ao defletor
$\delta V_{\text{rep}}, \delta Q_{\text{rep}}$	Correção associada à repetibilidade
δT	<i>Drift</i> do termómetro
ε	Erro
ε/D	Rugosidade relativa
ξ	Coeficiente de perda de carga singular
η	Rendimento da bomba
ρ_A	Massa volúmica do ar
$\rho_B, \rho_{\text{mbal}}$	Massa volúmica das massas da balança
ρ_W, ρ	Massa volúmica da água
σ	Tensão
σ_{adm}, S	Tensão admissível
σ_{ced}	Tensão de cedência

σ_{rot}	Tensão de rotura
\emptyset	Ângulo entre o eixo de revolução e o raio de curvatura tangencial
\emptyset_{ext}	Diâmetro externo
ω	Velocidade de rotação
a	Valor da incerteza apresentada
c_i	Coefficiente de sensibilidade
D_i, D, \emptyset_{int}	Diâmetro interno
DN	Diâmetro nominal
E	Coefficiente de eficiência de soldadura
F	Força aplicada
f	Fator de atrito
g	Aceleração gravítica
H_m	Altura de elevação
H_S	Altura disponível de aspiração
H_{S_i}	Altura disponível de aspiração crítica
h	Altura de coluna de água
I_E	Massa inicial
I_L	Massa final
K	Coefficiente característico do troço
k	Fator de expansão
l, L	Comprimento do tubo

N_ϕ, N_θ	Esforços de membrana
n	Número de observações
\dot{P}	Trabalho da bomba
P	Pressão
PMTA	Pressão máxima admissível
P_0	Pressão atmosférica
P_v	Pressão de vaporização
p_0	Pressão aplicada
p_r, P	Pressão aplicada total (tendo em conta a pressão exercida pelo fluido)
Q_v	Caudal volúmico
\bar{q}	Valor médio de caudal/volume
q	Valor obtido
R_{bal}	Resolução da balança
R_e	Número de Reynolds
r_0	Distância do ponto ao eixo de revolução
r_1	Raio de curvatura do meridiano
r_2	Raio de curvatura tangencial
s	Desvio padrão
t	Espessura
t_f	Tempo final
t_i	Tempo inicial

U	Incerteza de medição expandida
$u(\alpha_{\text{água}})$	Incerteza associada ao coeficiente de expansão térmica da água
$u(\alpha_{\text{tubo}})$	Incerteza associada ao coeficiente de expansão térmica do material da tubagem
u, u_i	Incerteza padrão
$u(bal)$	Incerteza da balança
$u_{\text{paquímetro}}$	Incerteza associada ao paquímetro
$u(T)$	Incerteza associada à temperatura
$u(\text{term})$	Incerteza do termómetro
v_{ef}	Graus de liberdade efetivos
V	Volume
VM	Valor medido
VR	Valor real
v	Velocidade de escoamento
W_B	Trabalho da bomba
W_P	Trabalho das perdas
W_T	Trabalho da turbina
X_i	Grandeza de entrada
x_i	Estimativa da grandeza de entrada
Y	Grandeza de saída
y	Estimativa da grandeza de saída
Z, h_x	Altura

1. INTRODUÇÃO

A distribuição de água para uso residencial, comercial e industrial é um serviço de interesse público que está associado à saúde e ao bem-estar da população. Para garantir uma adequada gestão dos recursos hídricos, assim como uma boa qualidade de serviço aos consumidores, é de extrema importância que as metodologias de calibração e de verificação de caudalímetros e contadores de água sejam desenvolvidas no sentido de fornecerem medições com a melhor exatidão possível [1].

Considerando o interesse das principais entidades responsáveis pela indústria relacionada com a distribuição de água, nomeadamente a EPAL, a RESOPRE e a JANZ, em melhorar a calibração de contadores e de caudalímetros de água, cabe ao Instituto Português da Qualidade (IPQ) promover e proporcionar os meios para um desenvolvimento da qualidade a nível nacional.

Deste modo, o IPQ é responsável por elaborar normas portuguesas e documentos normativos, garantindo a sua coerência e a atualidade do acervo normativo nacional, o que se alinha com a redação das especificações, requisitos e procedimentos do método a implementar [2] [3].

O novo Banco de Ensaio (BE) de caudalímetros e de contadores de água será desenvolvido no Laboratório de Volume e Caudal (LVC) do IPQ, em parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). O LVC é o laboratório primário em Portugal, na área de volume e de caudal, que tem como missão garantir a rastreabilidade à indústria, a organismos de verificação metrológica, laboratórios químicos, analíticos e farmacêuticos [4]. O trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação insere-se no domínio da metrologia científica, que é o ramo da metrologia que desenvolve e realiza os padrões primários com elevado rigor metrológico, sendo aplicadas metodologias científicas e utilizados instrumentos laboratoriais de elevada exatidão [5] [6].

1.1. Objetivos

Após uma primeira fase de formação teórica em Metrologia, incluindo a avaliação de incertezas e o conhecimento acerca do funcionamento do Sistema Português de Qualidade (SPQ), os objetivos centraram-se na pesquisa e na leitura de referências bibliográficas sobre a

construção, funcionamento e calibração de caudalímetros e de contadores de água. Em simultâneo, iniciou-se uma formação prática de calibração de equipamentos.

A formação recebida e as pesquisas realizadas visavam atingir o objetivo principal desta dissertação, nomeadamente a conceção e o projeto de um Padrão Nacional de medição de caudal e volume, baseado no método gravimétrico, para calibração de caudalímetros e de contadores de água.

Sabe-se que as atuais capacidades nacionais no âmbito da calibração destes aparelhos, baseadas principalmente no método volumétrico, apresentam resultados com valores de incerteza na ordem dos 0,2 %, pretendendo-se implementar um método capaz de conseguir obter incertezas inferiores a 0,1 %, que se traduzam numa melhoria significativa das medições realizadas.

Para esse efeito, o projeto passou por especificar tecnicamente os componentes necessários, por realizar os cálculos de interesse e por produzir os respetivos desenhos técnicos para fabrico. A implementação e a validação do Padrão ficarão, no entanto, dependentes de autorizações internas do IPQ e far-se-ão previsivelmente num futuro próximo.

Não obstante, identificaram-se as componentes de incertezas associadas à medição de caudal pelo método gravimétrico e foi redigido um procedimento experimental preliminar do sistema de medição projetado, com o objetivo de facultar os meios para a realização dos futuros ensaios experimentais.

Finalmente, com o objetivo de divulgar o trabalho realizado, fez-se a apresentação do projeto no VIII Encontro de Investigadores da Qualidade 2017, realizado em Coimbra.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação conta com 7 capítulos, que se subdividem em subcapítulos e, por sua vez, em secções.

Capítulo primeiro INTRODUÇÃO: Destaca-se a importância da calibração de contadores e de caudalímetros para a indústria e para uso doméstico. São dados a conhecer os objetivos e a estrutura da dissertação.

Capítulo segundo ENQUADRAMENTO: Neste capítulo são expostos alguns conceitos fundamentais que suportam a presente dissertação e dá-se a conhecer o Instituto Português da Qualidade (IPQ) e o Laboratório de Volume e Caudal (LVC).

Capítulo Terceiro MATERIAIS E MÉTODOS: Neste capítulo são abordadas as teorias, referências normativas e metodologias utilizadas para planejar e desenvolver o projeto, bem como os métodos que serão aplicados na prática de calibração. Neste capítulo é apresentado também parte do estado de arte que decorreu da investigação de instalações construídas para o mesmo propósito.

Capítulo Quarto CONCEÇÃO E PROJETO DO PADRÃO: No capítulo reafirma-se a necessidade do projeto e faz-se a sua contextualização. Os fundamentos da Teoria e Metodologias de Projeto são utilizados para especificar as funcionalidades que caracterizam o projeto, os seus constrangimentos e as suas soluções práticas. Configura-se a composição modelar do projeto final e são feitos os dimensionamentos necessários para o projeto da instalação.

Capítulo quinto CÁLCULO DE INCERTEZAS: Neste capítulo aborda-se a teoria referente à incerteza de medição e sua avaliação e a determinação da incerteza de medição no padrão pelo método gravimétrico.

Capítulo sexto PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: Neste capítulo é desenvolvido um procedimento experimental para calibração de contadores/caudalímetros de água com o padrão desenvolvido. Este capítulo aborda as condições de referência e modo operativo.

Capítulo Sétimo CONCLUSÃO: Capítulo onde são expostas as conclusões referentes ao desenvolvimento da dissertação e trabalhos que podem vir a ser desenvolvidos. Foi feita uma reflexão alusiva aos objetivos propostos inicialmente e sua respetiva realização.

2. ENQUADRAMENTO

2.1. Metrologia

A origem da Metrologia (ciência da medição) remonta às civilizações antigas, onde já nessa altura se sentia a necessidade de dimensionar e construir. A ciência da medição começou a dar os seus primeiros passos na civilização egípcia, 3000 anos a.C., com o desenvolvimento do primeiro padrão, o chamado “cubito Real”. Esta medida consistia no comprimento do braço do faraó, que se encontrava a governar, medido do cotovelo até a extremidade do dedo médio distendido, mais a largura da sua mão. Esta medida era registada e esculpida em granito preto, servindo assim como primeiro padrão para dar rastreabilidade a todo o império [6].

A Metrologia em Portugal também passou por um processo de desenvolvimento. Sendo o povo português um povo mercantil, houve, desde cedo, a necessidade de comparar, medir e conhecer para que fosse possível negociar. Um comprimento, uma massa ou um volume correspondiam a um preço de um determinado produto. Existiram várias técnicas para conceber padrões de referência; uma delas foi a gravação de uma vara, com determinado comprimento num local central da localidade, nomeadamente castelos ou igrejas. Assim todos os mercadores sabiam o rácio (Preço/comprimento de tecido) que era dado pelo comprimento da vara [7].

Como se percebe, estes não eram sistemas uniformes, pelo que houve a preocupação por parte dos governantes em construir padrões nacionais de referência. A França foi o país que mais e melhor contribuiu para a ciência da medição neste sentido, pois foi aí que surgiram as unidades de medida e padrões de referência como os conhecemos hoje [7].

Nas sociedades modernas, a Metrologia desempenha um papel vital em todas as áreas, sejam elas de índole económico, social ou político. Existem variadíssimos exemplos onde a metrologia é aplicada: na saúde, onde um sistema doseador de fármacos mal calibrado pode ser fatal à vida humana; na segurança rodoviária, onde um alcoolímetro pode fazer a diferença; Na qualidade, onde o controlo e rigor de uma inspeção às emissões de gases poluentes são fundamentais para o controlo do meio ambiente, etc.

A Metrologia é a ciência das medições. É um conjunto de conhecimento científico e tecnológico que engloba todos os aspetos teóricos e práticos inerentes a ela. Assegura a conformidade dos produtos e processos através de calibrações de instrumentos e realização de ensaios. Esta visa a confiabilidade dos sistemas de medição, garante as especificações técnicas e normas existentes, promove a qualidade, inovação e competitividade [8].

Em síntese, a Metrologia dedica-se essencialmente a três atividades principais [6]:

- A definição de unidades de medida internacionalmente aceites.
- Recurso a métodos científicos específicos para a realização das unidades de medida; exemplo disso é a medida “metro” através de tecnologia laser.
- O estabelecimento de cadeias de rastreabilidade, ficando documentado a relação entre um produto e os padrões internacionais.

2.2. Categorias da Metrologia

A Metrologia está dividida em três grandes categorias:

Metrologia Científica- Desenvolve padrões primários internacionais e nacionais com elevado rigor metrológico. São aplicadas pesquisas e metodologias científicas e utilizados instrumentos laboratoriais de elevada exatidão. Os resultados de um laboratório primário são frequentemente comparados com outros laboratórios primários para verificar a sua conformidade [6] [5].

Metrologia Aplicada- Presta serviço ao assegurar o bom funcionamento dos instrumentos de medição utilizados na indústria, dos processos e dos ensaios metrológicos. Esta atividade é desenvolvida por laboratórios acreditados e laboratórios nacionais que apresentam rastreabilidade dos laboratórios primários [6].

Metrologia Legal- Assume a responsabilidade de proteger o consumidor final ao assegurar o controlo metrológico dos instrumentos de medição e a exatidão das mensuradas quando estes têm influência direta em transações comerciais, saúde, segurança e ambiente [6] [5].

2.3. Instituto Português da Qualidade (IPQ)

O Instituto Português da Qualidade é uma instituição pública, com competências jurídicas, que visa proteger os interesses do Estado Português. O IPQ é um instituto integrado na administração interna do Estado, mas que dispõe de autonomia financeira, administração e património próprio [2] [3].

Segundo o Decreto-Lei nº 71/2012 de 21 de março de 2012, o IPQ prossegue atribuições do Ministério da Economia e do Emprego (MEE) e tem como missão a coordenação do Sistema Português de Qualidade (SPQ) e outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe foram conferidos por lei. Cabe-lhe promover e coordenar a ação de agentes económicos e desenvolver atividades necessárias à sua função de laboratório nacional de metrologia [2] [3].

O IPQ é a entidade responsável por elaborar normas portuguesas e documentos normativos garantido a coerência e atualidade do acervo normativo nacional, bem como promover o desenvolvimento do SPQ com vista ao incremento da Qualidade e qualificação de pessoas, contribuindo para o aumento da produtividade, competitividade e inovação nos sectores público e privado [2] [3].

Na Figura 2.1 é apresentada a estrutura interna do Instituto Português da Qualidade (IPQ), aprovada 24 de janeiro de 2013 pela Portaria nº23/2013 [9]:

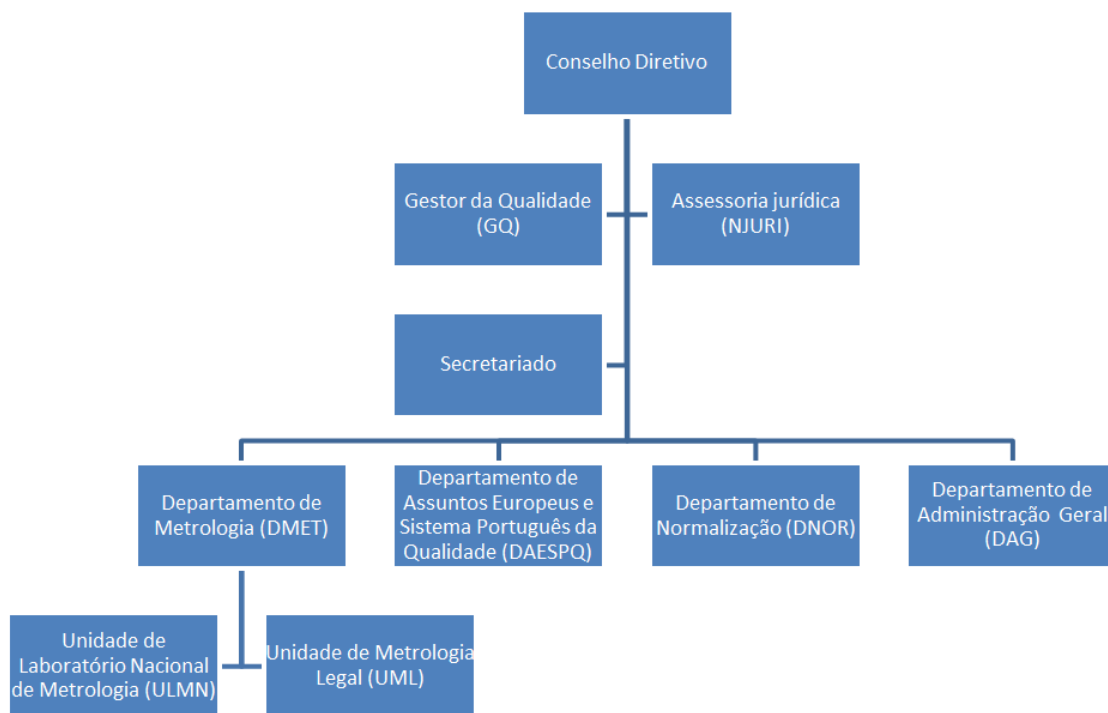


Figura 2.1 - Estrutura Organizacional do IPQ [2]

Dentro do Departamento de Metrologia encontra-se a Unidade de Laboratório Nacional de Metrologia (ULMN), a Figura 2.2 ilustra alguns domínios de actividade do DMET:

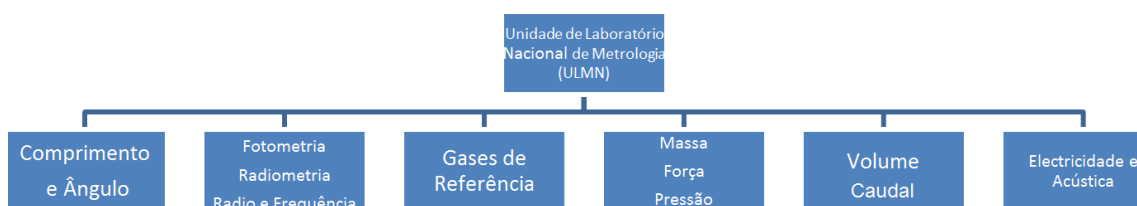


Figura 2.2 - Estrutura Orgânica da Unidade de Laboratório Nacional de Metrologia

2.4. Laboratório de Volume e Caudal (LVC)

O Laboratório de Volume e Caudal é o laboratório primário em Portugal na área de volume e caudal (Figura 2.3 e Figura 2.4). Tem como missão prestar serviços de calibração à indústria, fundamentalmente a organismos de verificação metrológica, laboratórios químicos, analíticos e farmacêuticos [4].

A calibração de instrumentos neste laboratório tem como objetivo quantificar a diferença entre o valor nominal e o valor verdadeiro, encontrar erros sistemáticos nos processos analíticos e proceder à sua correção. É com a ajuda de métodos e padrões de elevada exatidão que é possível assegurar a correta medição do volume [4].

Este laboratório obtém rastreabilidade do DMET e participa regularmente em comparações da *European Association of National Metrology Institutes* (EURAMET). Desenvolve ainda vários trabalhos de validação e melhoria dos métodos/padrões de calibração com universidades. Coordena e desenvolve as comparações entre laboratórios secundários em colaboração com o IPAC [4].

O LVC tem instalações que permitem o trabalho na ordem de:

- Pequenos volumes (Instrumentos volumétricos de vidro e com êmbolo);
- Grandes volumes (Recipientes graduados);
- Caudal (Instrumentos doseadores de líquidos e caudalímetros).



Figura 2.3 - Laboratório de pequenos volumes e de micro caudal.



Figura 2.4 - Laboratório de médios e grandes volumes.

2.5. Termos e Definições Metrológicas Utilizadas

Caudal volúmico: Grandeza derivada, que representa o escoamento de uma grandeza volúmica quantificável em metros cúbicos por hora (m^3/h).

Caudalímetro de água: Instrumento concebido para medir de forma contínua, registar e indicar o caudal de água que passa através dele, nas condições normais de funcionamento.

Condições de repetibilidade: Condição de medição, que inclui o mesmo procedimento de medição, os mesmo operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições operativas e a mesma localização, e medições repetidas no mesmo objeto ou objetos similares, num curto intervalo de tempo [10].

Contador de água: Instrumento concebido para medir de forma contínua, registar e indicar o volume de água que passa através dele, nas condições normais de funcionamento [1].

Exatidão de medição: Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de uma mensuranda [10].

Incerteza de medição: Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensuranda a partir das informações usadas [10].

Instrumento de medição: Dispositivo usado para realizar medições, isolado ou em conjunto com dispositivos complementares [10].

Procedimento de medição: Descrição detalhada de uma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e um dado método de medição, baseado num modelo de medição e incluindo todos os cálculos para obter um resultado de medição [10].

Rastreabilidade metrológica: Propriedade de um resultado de medição através do qual o resultado pode ser relacionado a uma referência por intermédio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição [10].

Volume: Grandeza derivada que quantifica o espaço ocupado por um corpo, no espaço tridimensional de um referencial ortogonal. Com unidade derivada do metro, o metro cúbico [10].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Método Gravimétrico

A utilização de métodos apropriados é fundamental para a boa prática de calibração, sendo essencial para atingir os resultados mais exatos possíveis e credíveis do ponto de vista científico [11].

O método gravimétrico permite determinar o volume do líquido contido no recipiente através da pesagem da sua quantidade mássica. Para tal, deve-se pesar inicialmente o recipiente vazio, e pesar novamente no final, quando cheio. O valor da quantidade de líquido contido no recipiente é calculado pela diferença entre a massa final e a massa inicial [11]. Para determinar o caudal, basta apenas associar ao cálculo a medição da duração de enchimento do recipiente.

É ainda importante garantir a boa aplicação deste método. Para isso, deve-se controlar a temperatura de local ao longo do ensaio, $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ e verificar a limpeza interna dos instrumentos que irão ser calibrados, bem como os dispositivos de pesagem [12].

Este método permite elevada exatidão de medição e pequena incerteza associada; possibilita calibrar instrumentos volumétricos e medidores de caudal com elevado rigor e com a facilidade de evidenciar possíveis erros associados aos dispositivos a calibrar [12]. Este método será utilizado como referência primária de medição.

3.1.1. Método “Standing Start-and-Stop” (SSS)

Neste método o escoamento deve ser iniciado através da abertura de uma válvula, preferencialmente localizada a jusante do DUT (dispositivo a calibrar), e parado pelo fecho dessa mesma válvula. O t é determinado entre o início do movimento de abertura da válvula e o fim do seu fecho. A leitura no DUT é feita entre o arranque e a paragem do escoamento, que corresponde à quantidade recolhida no recipiente de pesagem [13].

3.1.2. Método “Flying-Start-and-Finish” (FSF)

Este método consiste nas leituras efetuadas sob condições de escoamento estabilizado em que um defletor desvia o escoamento para dentro do reservatório de pesagem e no fim desvia para fora dele. O tempo, tal como a leitura no DUT, deve ser medido desde o início da comutação até ao final da mesma [13].

3.1.3. Método de Pesagem Estático

Método de pesagem segundo o qual a massa do fluido recolhido é obtida deduzindo a tara, determinados respetivamente antes e depois de se ter dirigido o fluido para o recipiente de pesagem, durante um intervalo de tempo determinado [14].

3.1.4. Método de Pesagem Dinâmico

Método de pesagem segundo o qual a massa do fluido é obtida através de pesagens, realizadas enquanto o fluido é recolhido diretamente no reservatório de pesagem [14]. Este método permite determinar a massa segundo condições ambientais adversas ou segundo um comportamento de deslocação das amostras. É calculado o valor médio da massa de fluido instantânea [15].

Este método faz uma leitura incremental da quantidade mássica coletada no reservatório por unidade de tempo, uma vez que a medição sofrerá perturbações devido à impulsão, força das ondas, inércia do líquido e da balança [16]. Este procedimento deve ser apoiado por um sistema automático de gravação de dados.

3.1.1. Cálculo do Volume

O volume de líquido é determinado pela Equação 3.1, adaptada da Norma ISO 4185 (1980) [12] [16]:

$$V = \left[\frac{(I_L - I_E)}{\rho_W} \times \left(\frac{1 - \frac{\rho_A}{\rho_B}}{1 - \frac{\rho_A}{\rho_W}} \right) + \Delta V \right] + \delta V_{def} + \delta V_{evap} + \delta V_{rep} \quad \text{Equação}$$

3.1

Onde:

V – Volume, m³;

I_L – Massa final, kg;

I_E – Massa inicial, kg;

ρ_W – Massa volúmica da água, kg/m³;

ρ_A – Massa volúmica do ar, kg/m³;

ρ_B – Massa volúmica das massas da balança, kg/m³;

ΔV – Variação de volume no tubo, m³;

δV_{def} – Correção associada ao defletor, m³;

δV_{evap} – Correção associada à evaporação, m³;

δV_{rep} – Correção associada à repetibilidade, m³;

Em que ΔV representa a quantidade de água que permanece na tubagem, não sendo contabilizada na balança.

$$\Delta V = \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) (1 - (\alpha_{\text{água}} - 3\alpha_{\text{tubo}})\Delta T)$$

Onde:

D_i – Diâmetro interno do tubo, m;

l – Comprimento do tubo, m;

$\alpha_{\text{água}}$ – Coeficiente de expansão térmica da água, °C⁻¹;

α_{tubo} – Coeficiente de expansão térmica do material da tubagem, °C⁻¹;

ΔT – Diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura de referência, °C;

Nota: ρ_W (massa volúmica da água) e ρ_A (massa volúmica do ar) são obtidas através da fórmula de *Tanaka* e *Spieweck*, respetivamente – Anexo I

3.1.2. Cálculo do Caudal

A quantidade mássica é convertida para caudal volúmico segundo a Equação 3.2, adaptada da Norma ISO 4185 (1980) [12] [16].

$$Q_V = \frac{1}{t_f - t_i} \left[\frac{(I_L - I_E)}{\rho_W} \times \left(\frac{1 - \frac{\rho_A}{\rho_B}}{1 - \frac{\rho_A}{\rho_W}} \right) + \Delta V \right] + \delta Q_{def} + \delta Q_{evap} + \delta Q_{rep} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

Q_V – Caudal volúmico, m^3/s ;

t_f – Tempo final, s;

t_i – Tempo inicial, s.

δQ_{def} – Correção associada ao defletor, m^3/s ;

δQ_{evap} – Correção associada à evaporação, m^3/s ;

δQ_{rep} – Correção associada à repetibilidade, m^3/s ;

3.2. Teoria e Metodologias de Projeto

A conceção de um novo produto pode ser um processo sistemático e metódico, mas também intuitivo e desordenado, envolvendo métodos matemáticos, heurísticos e criativos [17]. Apesar de todos estes métodos serem utilizados, o processo psicológico que ocorre na formulação de uma nova ideia continua a ser desconhecido. Karl Popper (1959) afirmou que “não existe um método lógico para conceber novas ideias ou reconstruir logicamente o seu processo” uma vez que os resultados que surgem da criatividade e da imaginação assentam num contexto psicossocial, completamente fora do conceito lógico da Ciência [18]. Pessoas diferentes pensam de maneira diferente, portanto, uma ideia para um produto de engenharia vai certamente ter diferentes formas, tamanhos, componentes, etc., dependendo do projetista. Contudo, existem teorias e metodologias que são encaradas como boas práticas de projeto e servem como diretrizes para o elaborar, é o caso da Teoria Axiomática de Projeto.

3.2.1. Teoria

Por Teoria entende-se a análise de um conjunto de factos que se relacionam entre si. Os princípios gerais ou abstratos de um conjunto de factos, uma ciência ou uma arte [19].

3.2.2. Metodologia

A metodologia é um conjunto de métodos, regras e postulados empregados por uma disciplina, sendo o estudo dos métodos, a análise dos princípios ou procedimentos de investigação num campo específico [19].

3.2.3 Projeto de Engenharia

O Projeto de Engenharia é uma atividade que procura satisfazer as necessidades humanas, particularmente aquelas que podem ser atendidas recorrendo à tecnologia existente na nossa cultura [19].

3.2.4. Projeto Axiomático

O Projeto Axiomático (AD) foi desenvolvido por N.P. Suh no MIT, no final dos anos 80's, e tinha como objetivo ser utilizado como um modelo na conceção de projetos de engenharia [20]. O projeto axiomático permite projetar em detalhe e avaliar a relação entre os objetivos e as tentativas de solução em qualquer ponto do processo. O AD é baseado na hipótese de que existem princípios fundamentais que governam a boa prática de projeto [21].

3.2.4.1. Domínios

Do ponto de vista do Projeto Axiomático, os *outcomes* do projeto pertencem sempre a um dos quatro domínios: Domínio do cliente, Domínio funcional, Domínio físico ou Domínio do processo. Como se pode ver na Figura 3.1, o processo do projeto tem início no domínio do cliente com o esclarecimento das necessidades do mesmo (CN's); de seguida, um mapeamento entre o domínio do cliente e o domínio funcional permite descobrir os requisitos funcionais (FR's) que satisfaçam os desejos do cliente. Uma vez feito, segue-se o mapeamento entre o domínio funcional e o físico dos quais resultam os parâmetros de projeto (DP's), i.e., o conjunto de propriedades que descrevem o projeto no domínio físico. Por fim, o mapeamento do domínio físico para o domínio do processo que se traduz nas variáveis de processo (PV's). As PV's descrevem como os elementos do projeto devem ser produzidos [20].

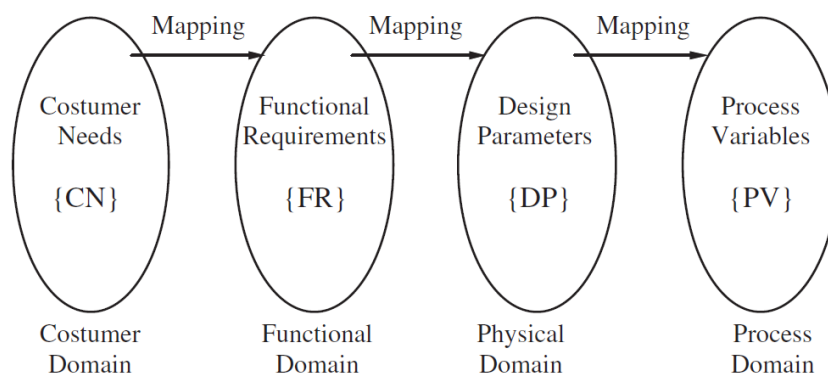


Figura 3.1 - O processo do projeto visto como um mapeamento através dos 4 domínios [22]

- **Necessidades do Cliente [19]**

São os benefícios que são esperados pelos clientes. Muitas das vezes, os clientes não são explícitos, fazendo apenas uma formulação não técnica e não quantitativa do que pretendem.

- **Requisitos Funcionais [19]**

É o conjunto mínimo de encargos que caracterizam completamente os objetivos do projeto. Os objetivos derivam das necessidades do cliente. Estes encargos devem ser considerados como funções a alcançar e não como soluções específicas. Geralmente, são exprimidos através de verbos tal como “fornecer”, “gerar”, “aumentar”, etc.

- **Parâmetros de Projeto [19]**

É o conjunto de elementos que foram selecionados para satisfazer os Requisitos Funcionais do projeto. Os DP's descrevem as características físicas (materiais, forma, tamanho, etc.) ou seja, a concretização da solução de projeto.

- **Variáveis de Processo [19]**

São as metodologias e os processos de construção usados para satisfazer os Parâmetros de Projeto. As PV's descrevem os processos de fabrico dos elementos do objeto.

- **Constrangimentos [19]**

Fora dos 4 domínios existem ainda os Constrangimentos (C's): São as limitações técnicas, económicas, sociais, ambientais e políticas impostas pelos *stakeholders*. Os Constrangimentos impõem limitações à liberdade do projetista para procurar soluções que poderiam ser consideráveis.

Qualquer uma das etapas de mapeamento acima mencionadas não nos levam sempre ao mesmo resultado e dependendo da forma como são executadas, podem levar a boas soluções de projeto ou a soluções de projeto “pobres”. Do ponto de vista do AD um bom projeto é aquele que respeita o **axioma da independência**. Esta conformidade, ou não, é facilmente percebida através de uma análise do mapeamento do domínio funcional para o físico. Em termos matemáticos, o mapeamento é representado pela equação 3.3 [20].

$$\{\partial FR\} = [A]\{\partial DP\},$$

Equação 3.3

Onde $\{FR\}$ é o vetor dos requisitos funcionais e $\{DP\}$ o vetor dos parâmetros de projeto, ambos na forma diferencial e $[A]$ é a matriz projeto, em que os seus elementos estão na forma (Equação 3.4):

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad \text{Equação 3.4}$$

A Equação 3.4 pode ser integrada para problemas lineares, (i.e., quando os elementos da matriz são constantes) e transforma-se na Equação 3.5.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad \text{Equação 3.5}$$

3.2.4.2. Axiomas

▪ Axioma da independência

O axioma da independência entende que se deve manter a independência dos requisitos funcionais, ou seja, para um projeto aceitável, cada FR deve ser satisfeito sem afetar outro FR. Como se pode ver na Figura 3.2, o número de linhas e colunas da matriz projeto, bem como a maneira que é preenchida, é fundamental para a classificação do projeto. Para um bom projeto o número de DP's tem de ser igual ao número de FR's, sendo este desacoplado se a matriz for diagonal e desacoplável se a matriz for triangular. Ambas as soluções são consideradas boas, mas vale a pena referir que soluções desacopladas são melhores que soluções desacopláveis. Por outro lado, se a matriz projeto não for nem diagonal nem triangular estamos perante uma solução acoplada, considerada como uma solução “pobre”[23].

No caso da matriz ser acoplada, os DP's não satisfazem os FR's de maneira independente, resultando num sistema caótico, complicado de controlar e ajustar. Pelo contrário, num sistema desacoplado, cada DP satisfaz o seu FR, o que resulta num sistema facilmente controlável. No projeto desacoplável, os FR's precisam ser controlados segundo uma determinada ordem.

Projeto Desacoplado	Projeto Desacoplável	Projeto Acoplado
$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ x & x & 0 & 0 \\ x & x & x & 0 \\ x & x & x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & x & x & x \\ x & x & x & x \\ x & x & x & x \\ x & x & x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{Bmatrix}$

Figura 3.2 - Matrizes de Projeto [19]

▪ Axioma da informação

Este axioma considera minimizar o conteúdo da informação do projeto, ou seja, num conjunto de DP's que satisfaçam os requisitos funcionais e estejam de acordo com o axioma da independência, deve-se escolher aquele que apresentar menor informação[20].

O conteúdo da informação, I , para o caso simples de um projeto com apenas um FR e um DP é definido como sendo o inverso da probabilidade de alcançar o objetivo do projeto com um valor aleatório (mas possível) para o DP (Equação 3.6) [20]:

$$I = \log_2 \frac{(\text{Area of the sistem range})}{(\text{Area of the common range})} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde a área do alcance do sistema é calculada a partir da função densidade de probabilidade do FR e a área do intervalo comum é a fração da área que está dentro dos limites da gama de projeto (ver a Figura 3.3) [20].

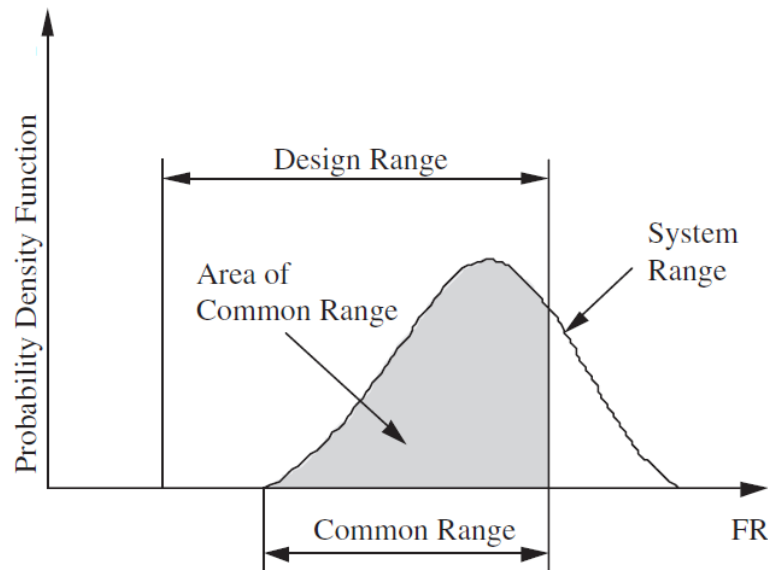


Figura 3.3 - Cálculo da probabilidade de sucesso de um DP satisfazer o FR [22]

Para um projeto desacoplado com n FR's, o conteúdo da informação total, I_t , pode ser calculado através da Equação 3.7:

$$I_t = \sum_{i=1}^n \log_2 p_i = \sum_{i=1}^n I_i \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde p_i é a probabilidade de FR ser satisfeito por um DP.

Analisando a Equação 3.7 observa-se que quanto mais baixa for a probabilidade de sucesso, maior é o conteúdo de informação. Pode-se concluir que a introdução de informação desnecessária apenas contribui para tornar o sistema mais complexo e confuso. Deste modo, o conteúdo de informação do projeto deve ser minimizado o quanto possível.

3.2.4.3. Hierarquização e Zigzagging

De acordo com o AD, o projeto deve ser desenvolvido do nível superior para o inferior, sendo que os inferiores apresentam maior detalhe. O processo deve avançar em ziguezague até o projeto estar totalmente definido. Este método é chamado de decomposição hierárquica e o seu resultado é um modelo em árvore. A Figura 3.4 ilustra uma decomposição entre o domínio funcional e o domínio físico do projeto de um motor. Como se pode ver, a seleção dos FR's de segundo nível é consequência do DP escolhido no primeiro nível (motor de combustão interna), caso fosse escolhido um motor elétrico os FR's selecionados já não fariam sentido. Assim, pode-se concluir que qualquer decisão tomada apresenta consequências nos níveis inferiores. O método de hierarquização e *zigzagging* permite estruturar e planejar um grande projeto através da decomposição de um problema em vários de menor dimensão e resolução mais acessível [20].

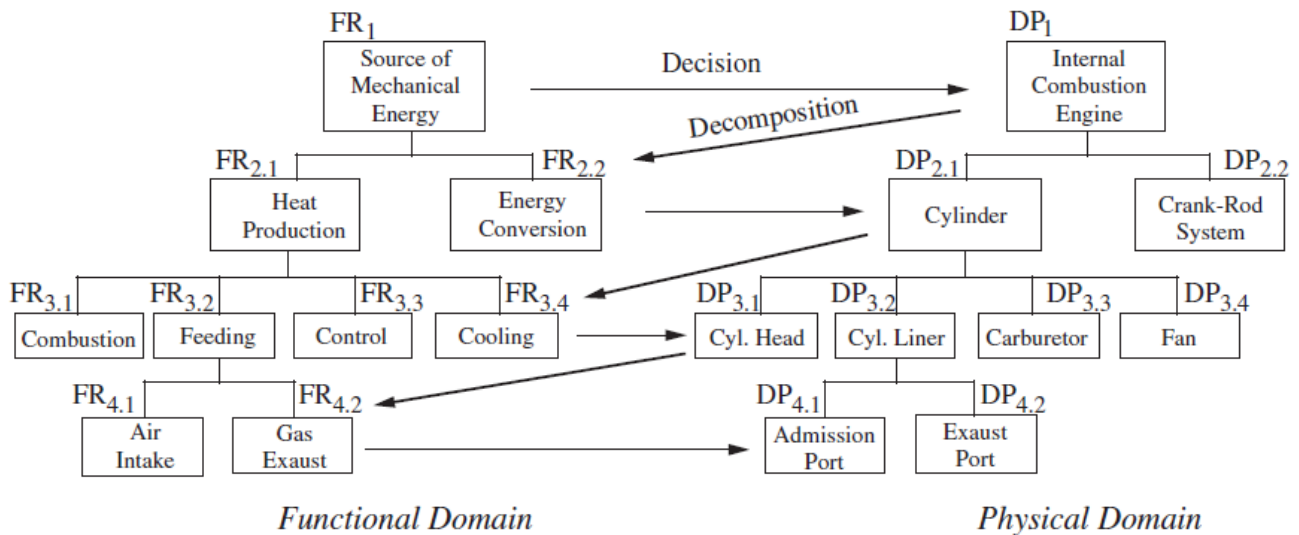


Figura 3.4 - Caminho em zigzag para uma decomposição hierárquica [20]

3.3. Normalização

As normas desempenham um papel fundamental no bom funcionamento do mundo como o conhecemos. O que aconteceria se não existissem normas sobre materiais de construção, qualidade dos alimentos ou segurança de equipamentos? Pois bem, a normalização desempenha um papel essencial no aumento dos níveis de qualidade, segurança, eficiência, interoperabilidade, bem como no fornecimento de todos estes benefícios, com um custo reduzido [24].

Uma norma é considerada uma referência idónea para o mercado a que se destina, sendo por isso utilizada em processos de legislação, acreditação, certificação, metrologia, de informação técnica e de relações comerciais entre cliente-fornecedor [24].

As normas são documentos de aplicação voluntária, excetuando casos em que a existência de um diploma legal as torna de cumprimento obrigatório [24].

3.3.1. Norma ISO 4064-1 *Water Meters for Cold Potable Water and Hot Water – Metrological and Technical Requirements* [1]

A parte 1 da norma ISO 4064 e a OIML R49 tratam da terminologia e especifica os requisitos técnicos e metrológicos para medidores de água potável fria e quente em conduta fechada.

Para além de medidores baseados nos princípios mecânicos, a parte 1 da norma ISO 4064 e a OIML R49 aplicam-se a outros baseados em princípios elétricos ou eletrónicos, e a mecânicos que incorporem aparelhos eletrónicos.

Estes documentos também se aplicam aos aparelhos eletrónicos auxiliares. Estes são opcionais, porém, é possível que os regulamentos nacionais ou regionais os tornem obrigatórios.

3.3.2. Norma ISO 4064-2 - *Measurement of Water Flow in Closed Conduits – Meters for Cold Potable Water* [25]

A norma ISO 4064-2 especifica critérios para a seleção de medidores de água, acessórios associados, instalação, requisitos especiais para alguns medidores e para a primeira calibração de medidores novos ou reparados.

Esta norma, aplica-se a instalações com um único medidor de água e medidores operando em paralelo. Não é aplicável à combinação de medidores.

Onde existem requisitos legais nacionais, eles terão, em todos os casos, precedência das especificações da ISO 4064-2.

3.3.3. Norma ISO 4064-3 - *Measurement of Water Flow in Closed Conduits – Meters for Cold Potable Water* [13]

A norma ISO 4064-3 é aplicável a medidores de água potável fria. Esta norma especifica os métodos e significados de testes a serem empregues na determinação das características principais dos medidores de água.

3.3.4. Norma ISO 4185 - *Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits – Weighing Method* [16]

Esta norma especifica um método de medição de caudal em condutas fechadas medindo a massa de líquido coletado no reservatório de pesagem durante um intervalo de tempo conhecido. Trata em particular os aparelhos de medição, os procedimentos, o método para o cálculo do caudal e a incerteza associada na medição.

O método descrito pode ser aplicado a qualquer líquido desde que a sua pressão de vaporização seja tal que qualquer fuga de líquido do reservatório de pesagem por vaporização não afete a precisão de medição requerida. Reservatórios de pesagem fechados e as suas aplicações na medição de caudal de líquidos de alta pressão de vaporização não são considerados nesta norma. Esta norma não considera também os casos de líquidos corrosivos e tóxicos.

Teoricamente, não há limite para a aplicação deste método que é normalmente usado em instalações fixas no laboratório. Contudo, por razões económicas, os laboratórios hidráulicos que utilizam este método conseguem normalmente produzir caudais até 1,5 m³/s.

Devido ao seu potencial de alta precisão, este método é frequentemente utilizado como método primário de calibração de outros métodos ou aparelhos para medição de caudal mássico ou volúmico.

3.3.5. Norma NP 2938 - Contadores de Água Limpa, para Uso Doméstico, Comercial ou da Indústria Ligeira; Verificações Metrológicas [26]

A norma tem a finalidade de ajudar a compreender as disposições legislativas, comunitárias e nacionais, bem como a especificar o vocabulário e definições, as verificações metrológicas, as condições de referência e os procedimentos aplicáveis aos contadores de água limpa, fria e quente, para uso doméstico, comercial ou da indústria ligeira.

3.3.6. Norma NP 4360 - Contadores de Água Potável Fria; Caudalímetros Eletromagnéticos. Terminologia, Definições, Características Tecnológicas e Características Metrológicas [27]

A norma NP 4360 descreve os princípios e as principais características de projeto dos caudalímetros eletromagnéticos industriais, destinados à medição do caudal de líquidos condutores em condutas fechadas em carga. Esta norma cobre a instalação, exploração, características de funcionamento e calibração destes aparelhos.

A presente norma só se aplica ao escoamento de água potável fria em condutas fechadas e é aplicável a caudalímetros, tanto de corrente alternada (c.a.), como de corrente contínua (c.c.) pulsatória.

3.4. Pesquisa Bibliográfica

Existem diversos laboratórios que utilizam o método gravimétrico para calibrar contadores e caudalímetros de água. O presente trabalho baseou-se na instalação e componentes utilizados em algumas destas instalações hidráulicas.

3.4.1. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

No seguimento de uma visita ao LNEC, foi possível conhecer a instalação hidráulica existente nos seus laboratórios (Figura 3.5).

Esta instalação é utilizada na calibração de contadores/caudalímetros de grande dimensão (comercial e industrial) e apresenta incertezas de medição na ordem dos 0,3 %. Esta dispõe essencialmente de um reservatório de 340 m³, dois tanques de pesagem e duas balanças (1700

kg e 17000 kg de capacidade máxima), bombas de velocidade variável, filtros, válvulas e tubagem.

A tubagem divide-se em 4 ramais com 15 metros de comprimento, em que o diâmetro nominal (DN) de cada ramo pode ser permutado de modo a satisfazer capacidades entre o DN 80 e DN 400. Contam com uma ligação telescópica que permite o ajuste na colocação do DUT. Cada ramo é composto ainda por um caudalímetro eletromagnético, sensores de pressão e válvulas de ajuste de caudal. A pressão máxima permitida nas linhas é de 1 MPa (10 bar).

É utilizado um defletor para desviar o escoamento para as balanças. Esta comutação é feita depois do escoamento ser ajustado e permanecer estável. Dependendo da quantidade mássica a utilizar no ensaio é escolhida uma ou outra balança.



Figura 3.5 - Instalação de calibração em caudal situada no LNEC

3.4.2. NIST's Fully Dynamic Gravimetric Liquid Flowmeter Standard [28]

O LFS (Liquid Flow Standard) de 15 kg/s é uma instalação de calibração de caudal, em circuito fechado, feita pelo método gravimétrico, totalmente automatizada pelo comando *LabView* (Figura 3.6). O software personalizado foi desenvolvido para operar os componentes mecânicos do padrão, bem como para adquirir e armazenar dados de calibração. As calibrações

são feitas à temperatura ambiente e com o fluido pressurizado, nunca inferior aos 140 kPa para evitar a cavitação.

Os principais componentes do sistema são: o sistema de geração e controle do caudal, que consiste numa bomba de velocidade de rotação variável, reservatório, caudalímetro de referência, válvula de borboleta e sistema de aquisição de dados com controlador proporcional-integral-derivado (PID); uma secção de teste que acomoda um DUT em que o diâmetro do tubo pode variar entre 1,25 cm a 5 cm e um sistema de pesagem dinâmico composto por um reservatório de recolha e uma balança.

A incerteza expandida (correspondente ao nível de confiança de 95%) é de 0,021% para a gama de caudal mássico de 15 kg/s a 0,22 kg/s.

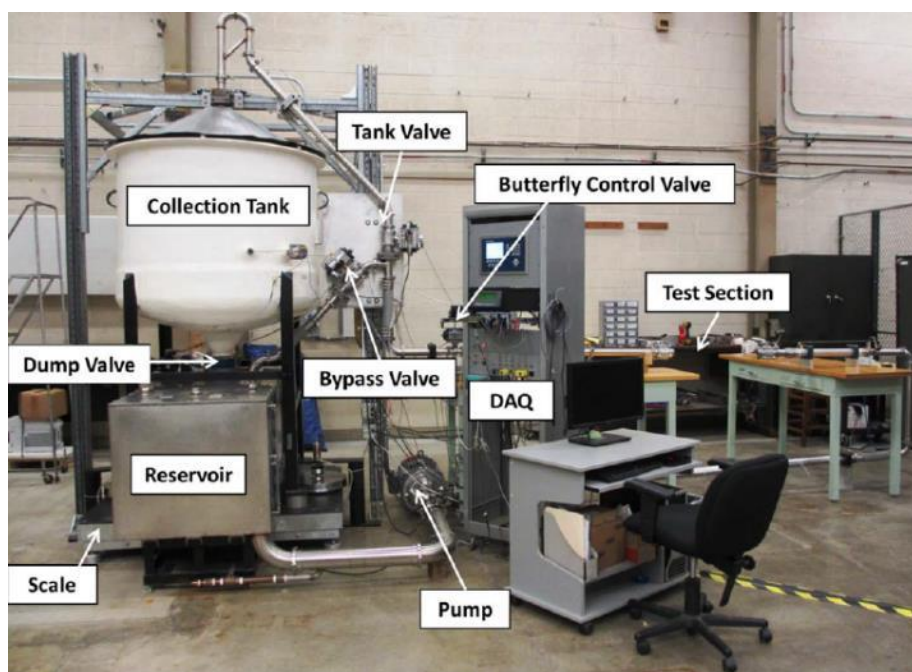


Figura 3.6 - Instalação de calibração em caudal situada no NIST [28]

3.4.3. EURAMET Project No. 1046 Inter-comparison of Water Flow Standards Using Electromagnetic Flowmeters [29]

No início de 2008, vários laboratórios nacionais europeus de caudal de água participaram numa comparação no âmbito da EURAMET, que serviu para verificar o seu desempenho no intervalo de caudais de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ a $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Foi utilizada água fria com a temperatura próxima dos 20°C . Doze laboratórios decidiram participar na comparação: Áustria (BEV), Bósnia e Herzegovina (IMBH), República Checa (CMI - laboratório piloto), França (CETIAT), Grécia

(EIM), Hungria (MKEH), Letónia (LNMC), Lituânia (VMT / LEI), República da Macedónia (BOM), Noruega (Justervesenet), Eslováquia (SMU) e Suíça (METAS). Dois padrões (Caudalímetros eletromagnéticos Krohne) foram distribuídos e circularam entre os participantes durante um período de aproximadamente um ano.

No MKEH (Hungria), a instalação (Figura 3.7) tem a capacidade de fornecer caudais entre 90 L/h e 300 m³/h com a pressão variando entre 0,5 e 4 bar. O valor de caudal de 300 m³/h é fornecido por quatro bombas de água controladas separadamente, conectadas em paralelo. O método de medição “*flying start-stop estático*” está disponível para qualquer um dos quatro caudalímetros eletromagnéticos de referência ou da escala da balança. É usado um defletor para o método “*flying start-stop estático*” com um padrão de escala de pesagem. O volume do reservatório de recolha é 3 m³, apoiado em 3 células em que carga máxima é de 3000 kg.



Figura 3.7 - Instalação de calibração em caudal situada no MKEH [29]

O BOM (República da Macedónia) apresenta um sistema com um funcionamento alternativo. A instalação OT1500 (Figura 3.8) usa um pistão para gerar o caudal. Um gás de pressurização aciona o êmbolo que desloca o fluido a uma determinada velocidade. O pistão, ligado a um sensor fotoelétrico (codificador), gera contínuos impulsos elétricos que representam

pequenas e precisas quantidades de volume de líquido. O OT1500 integra ainda as válvulas associadas, reservatórios de abastecimento e um contador para adquirir e exibir os dados.



Figura 3.8 - Instalação de calibração em caudal situada no BOM [29]

3.5. Caracterização de Contadores e Caudalímetros

3.5.1. Contador

É um instrumento concebido para medir de forma ininterrupta o volume de água que o atravessa, registando e indicando esse valor. A mensuranda, i.e., o volume total de água que passa através do instrumento é independente do tempo decorrido. O contador integra, pelo menos, um transdutor da medição que inclui um sensor de escoamento ou sensor de volume, um calculador e um dispositivo indicador [1].

O transdutor de medição tem como função transformar o volume de água a ser medido em sinais e por sua vez transmiti-los ao calculador. Este pode ter um funcionamento baseado em princípios mecânicos, elétricos ou eletrônicos [1].

O calculador recebe o sinal de saída proveniente do transdutor, transformando-o e armazenando os resultados na memória e o dispositivo indicador exibe os resultados da medição quer de forma permanente quer por consulta [1].

3.5.1.1. Tipos de Contador

A tipologia do contador está relacionada com o sensor de volume que pode ser um disco, êmbolo, roda, turbina, ou bobina eletromagnética, etc., e podem ser divididos em duas categorias: volumétricos e de velocidade [1].

O contador volumétrico, comumente utilizado para uso doméstico, baseia o seu funcionamento na passagem contínua de água por uma câmara de medição onde, no seu interior, se encontra um êmbolo rotativo. O fluxo de água provoca a rotação do pistão dentro da câmara, sendo que cada volta deste é equivalente a um volume de água conhecido [30].

O contador de velocidade, por sua vez, baseia o seu funcionamento na medição da velocidade a que se desloca o fluido. Estes podem ser divididos em diferentes tipos: os eletromagnéticos que utilizam a condutividade da água para medir o fluxo de água; mono-jato, multi-jato e woltmann (Figura 3.9), que através da rotação de um rotor determinam a quantidade de água e contadores de turbina que, como o próprio nome indica, utilizam a transmissão do movimento da turbina para determinar o volume de água que o atravessa [31].



Figura 3.9 - Contadores Multi-jato MST e Contador Woltmann MEISTREAM [32]

3.5.2. Caudalímetro

O caudalímetro é um instrumento concebido para medir de forma ininterrupta o caudal de água que o atravessa. O caudalímetro, da mesma forma que o contador, é composto por vários componentes. Denomina-se elemento primário ao tubo pelo qual se escoia a água, ao transdutor e sensor de escoamento. Elemento secundário, ao equipamento responsável por receber o sinal e o converter num sinal de saída normalizado. Este equipamento pode ser montado no elemento primário [27].

3.5.2.1. Tipos de Caudalímetros

Existem muitos tipos de caudalímetros e a sua utilização dependerá da aplicação e do tipo de líquido. Algumas das categorias de caudalímetros em conduta fechada são: caudalímetro de pressão diferencial, de velocidade, volumétrico e de massa.

Caudalímetros de pressão diferencial incluem tubos de venturi, placas de orifício, tubos de pitot, etc. Estes instrumentos são compostos por uma parte primária que causa uma mudança na energia do movimento, aumentando a pressão diferencial dentro do tubo e uma parte secundária que calcula o diferencial de pressão e fornece a leitura do sinal que é convertida no valor do caudal [31].

Entre os caudalímetros de velocidade estão os eletromagnéticos e os de turbina, entre outros. O seu funcionamento é baseado na medição da velocidade pela área de secção de escoamento [31].

Exemplos de caudalímetros volumétricos são: pistão alternativo, engrenagem oval, disco de natação e palheta rotativa. O seu funcionamento é baseado na passagem contínua de água pelos rotores que funcionam como câmara de medição, com valores de volume conhecidos. A quantidade de rotações é contada por um transmissor de pulso eletrônico integral e convertida em caudal [31].

Os caudalímetros de massa incluem os coriolis e térmicos. O coriolis tem um funcionamento baseado na força vibratória que o fluido exerce num tubo curvo [31].

4. CONCEÇÃO E PROJETO DO PADRÃO

Segundo Coelho (1994) [33], o fluxo de novos dados e informação provoca, na grande maioria dos casos, sentimentos alternados de frustração e contentamento. Sendo que o primeiro se deve à dificuldade em estruturar a informação que esses dados possam conter, nomeadamente analisar toda a informação de modo a distinguir o fundamental e o acessório e a rejeitar o redundante, irrelevante, incoerente, ou mesmo absurdo e o contentamento é fruto do alargamento de conhecimento e do sentimento que é possível solucionar os problemas [33].

Assim, as decisões tomadas foram sempre apoiadas em pesquisa bibliográfica: documentos de natureza empírica, manuais de projeto, normas e catálogos de fabricantes, opinião de utilizadores e fornecedores.

4.1. Identificação e Contextualização da Necessidade

Sendo que as atuais capacidades nacionais no âmbito da calibração de caudalímetros e contadores de água apresentam valores de incerteza na ordem de 0,2 %, justifica-se a necessidade da implementação do método gravimétrico, uma vez que este método permite obter resultados com incertezas entre 0,1 % e 0,05 %.

Deste modo, fez-se a conceção e o desenvolvimento de um novo padrão de referência que possibilitasse a calibração de caudalímetros e contadores de água pelo método gravimétrico com melhor exatidão.

Com vista a desenvolver e implementar este procedimento em Portugal, conta-se com a parceria das principais entidades interessadas: RESOPRE, EPAL e JANZ, na construção de especificações, requisitos e procedimento do método.

O IPQ tem ainda interesse em ser um dos Laboratórios Nacionais a participar em comparações metrológicas da EURAMET nesta gama de caudal pelo método gravimétrico.

Segundo registos do BIPM [34], são 16 os Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) com a capacidade de medição e calibração em caudal mássico, entre os quais está a França (LNE), Alemanha (PTB), Itália (INRIM), Holanda (VSL), E.U.A (NIST).

Com a construção e desenvolvimento desta instalação no LVC, o IPQ poderá aumentar a sua gama de medição de caudal, que neste momento apenas vai até 600 mL/h.

4.2. Requisitos Funcionais de Projeto

Um problema é formalmente definido através de um conjunto de especificações, às quais o objeto que se pretende conceber deve dar resposta. Inicialmente, esse objeto é totalmente desconhecido ao qual se procura analisar os seus requisitos funcionais, i.e., procurar as propriedades que deve possuir para satisfazer a necessidade, respeitando os constrangimentos que lhe são inerentes [33].

Sendo os requisitos funcionais de projeto o conjunto mínimo de pedidos que permitem atingir o objetivo proposto foi necessário esclarece-los e analisá-los.

Segundo a Dr^a. Elsa Batista, responsável pelo Laboratório de Volume e Caudal, os FR's de projeto foram:

- Desenvolver um Banco de Ensaio que permitisse operar com a maior gama de caudal possível.
- Dimensionar o Banco de Ensaio com capacidade para calibrar a maior diversidade de aparelhos que lhe fosse solicitado.

Tendo em conta que seria extremamente difícil e dispendioso conceber um projeto de tal dimensão, foi necessário limitar o projeto segundo aspetos técnicos e financeiros.

Não obstante, a resolução deste problema era bastante complexa, pelo que surgiu a necessidade de o decompor em problemas de menor complexidade e consequentemente, maior facilidade de resolução.

De acordo com as metodologias do Projeto Axiomático foi elaborado um mapeamento do Domínio funcional e físico. A Hierarquização e avanço em zigzag foram as ferramentas utilizadas para fazer a descrição dos FR's e DP's. O Axioma da Independência foi, sempre que possível, respeitado. A Figura 4.1 ilustra o esquema em árvore:

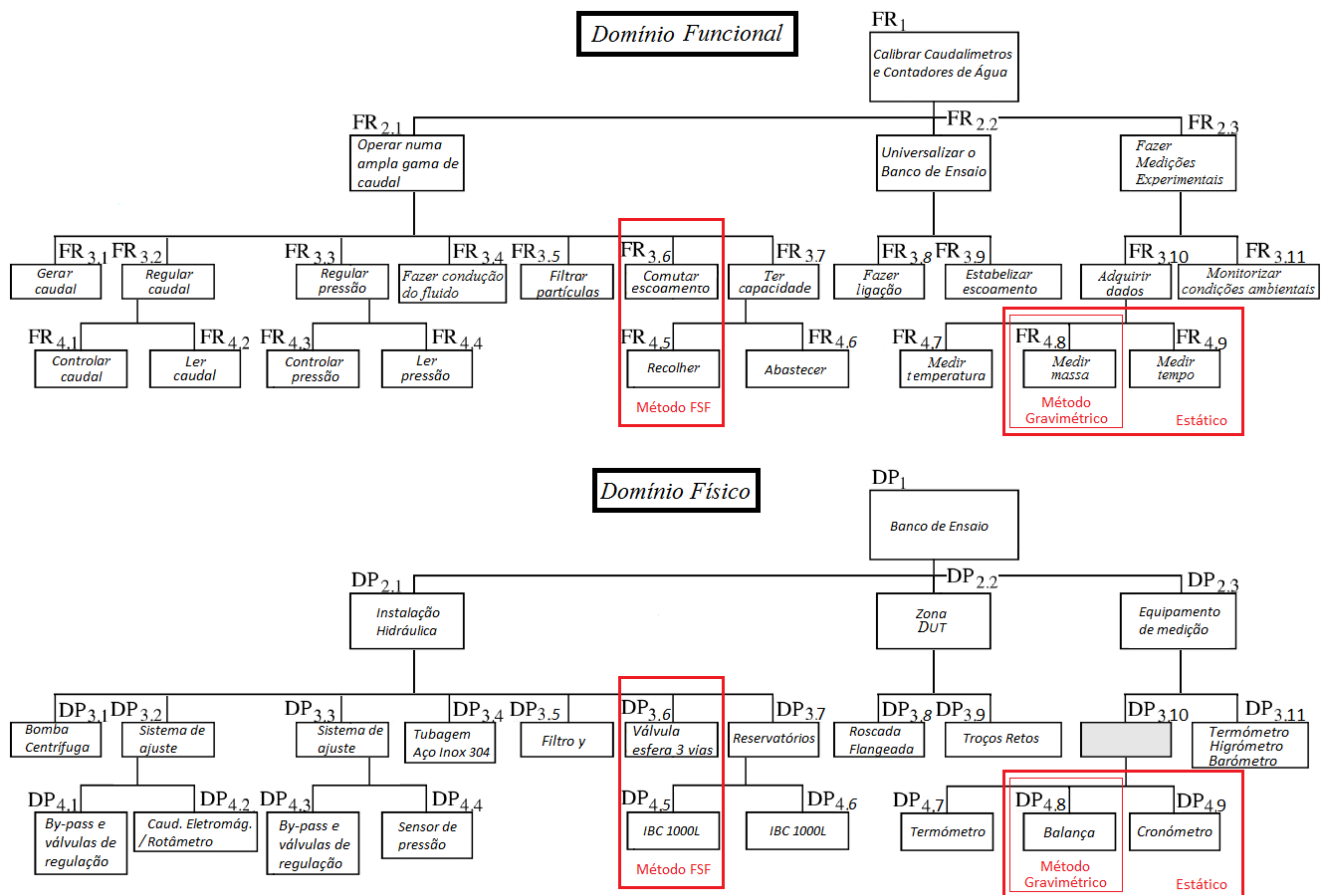


Figura 4.1 - Hierarquização e avanço em zigzag do Domínio funcional e físico.

A matriz projeto (Figura 4.2) foi desenvolvida a partir da Figura 4.1. A matriz é maioritariamente diagonal, o que significa que o projeto é desacoplado para quase todas as soluções, respeitando significativamente o Axioma da Independência.

FR's				DP's		Banco de Ensaio															
						Instalação hidráulica										Zona DUT		Equipamento de medição			
																		Termómetro			
						Bomba centrífuga	Sistema de ajuste	Regulação de pressão	Tubagem aço Inox	Filtro Y	Válvula esfera 3 vias	Reservatórios	Roscada e Flangeada	Troços retos	Termómetro	Balança	Cronómetro	Termómetro/Higrómetro/Barómetro			
1	2	3	4	By-pass e válvula de regulação	Caudalímetro eletr./rotâmetro	By-pass e válvula de regulação	Sensor de pressão				IBC 1000L	IBC 1000L									
Calibrar caudalímetros e contadores de água	Operar numa ampla gama de caudal	Gerar caudal		X																	
		Regular caudal	Controlar caudal		X	X															
			Ler caudal		X																
		Regular pressão	Controlar pressão		X	X															
			Ler pressão				X														
		Fazer condução do fluido						X													
		Filtrar partículas							X												
		Comutar escoamento								X											
	Ter capacidade	Recolher									X										
		Abastecer										X									
	Univer. o BE	Fazer ligação												X							
		Estabilizar escoamento													X						
	Fazer Medições experimentais	Adquirir dados	Medir temperatura													X					
			Medir massa														X				
			Medir tempo															X			
		Monitorizar condições ambientais																X			

Figura 4.2 - Matriz Projeto

Procedeu-se à interpretação e justificação de cada FR:

4.2.1. Operar numa Ampla Gama de Caudal

A gama de caudal deve ser estipulada segundo a gama de caudalímetros e contadores de água que se pretendem calibrar, nomeadamente residenciais, comerciais e industriais.

Deve-se dimensionar o Banco de Ensaio (BE) de modo a dar a resposta a que se propõem. Esta amplitude depende das características da instalação e dos componentes que a constituem.

4.2.1.1. Gerar Caudal

Existem diversas formas de gerar caudal, seja por ação gravítica, através de uma diferença de altura entre dois pontos (altura de queda), por diferença de pressão, onde um ponto se encontra a uma pressão relativa superior ao outro, ou por sistema de bombagem.

É importante que o escoamento, independente da forma, seja mantido de forma contínua e estável para que os resultados sejam no sentido de menor erro e incerteza possível.

4.2.1.2. Regular o Caudal

- **Controlar o Caudal**

O controlo do caudal pode ser realizado de diversos modos: regulação através de uma variação da área de secção de passagem; por controlo da velocidade de bombeamento do líquido; ou através de ambas.

É necessário que o caudal possa ser ajustado ao ponto desejado e se mantenha invariável.

- **Ler o Caudal**

Para se executar o ajuste do caudal é necessário fazer uma leitura instantânea deste. A leitura deve servir apenas para ajustar o caudal ao valor pretendido, antes de se proceder à aquisição de dados. O dispositivo deve estar calibrado, ser exato e preciso de modo a que a estimativa do caudal seja o mais próximo do real possível.

4.2.1.3. Regular a Pressão

- **Controlar a Pressão**

A necessidade de controlar e manter a pressão constante é uma exigência à qual se tem que dar resposta. Existem diversas formas de o fazer, seja por controlo da velocidade de bombeamento do líquido, seja por regulação através de válvulas de escape de pressão, entre outras.

É importante que a pressão, independente da forma, seja mantida e ajustada de forma estável.

- **Ler a Pressão**

A leitura de pressão instantânea é fundamental para se atingir a pressão desejada e controlar a sua estabilidade.

4.2.1.4. Condução do Fluido

A tubagem desempenha um papel fundamental na estrutura da instalação. O tipo de material, o preço, a espessura e a expansão térmica são características que devem ser tomadas em consideração na realização do projeto.

4.2.1.5. Filtrar Partículas

A filtragem de partículas representa um ponto de segurança na instalação. Deve-se filtrar o escoamento de forma a proteger os componentes de possíveis danos relacionados com partículas sólidas que possam advir da água, tais como areias ou depósitos.

4.2.1.6. Comutar o Escoamento

Sendo o ensaio efetuado pelo método “*Flying-start-and-finish*”, i.e., sob condições de escoamento estabilizado e com desvio do escoamento, é necessário ter um acessório que permita fazer esta comutação. O acessório deve ser preciso e de rápida atuação, de forma a minimizar o erro e a incerteza de medição [16].

4.2.1.7. Ter Capacidade

Grandes quantidades de água requerem capacidade de aprovisionamento e recolha do sistema. A gestão pode ser feita através da instalação de depósitos pressurizados, depósitos não-pressurizados, reservatórios, tanques, cisternas, etc.

4.2.2. Universalizar o Banco de Ensaio

O Banco de Ensaio deve apresentar as condições necessárias para instalar uma variedade de aparelhos. A gama do calibre foi escolhida de acordo com a gama de caudal com que se pretende trabalhar, nomeadamente contadores de domínio residencial, comercial e industrial.

4.2.2.1. Fazer a Ligação

Para ser possível instalar um determinado aparelho é necessário ter os acessórios de ligação adequados. A montagem e desmontagem deve ser fácil e segura. A tubagem deve ter uma ligação com diâmetro nominal igual ao da ligação do contador/caudalímetro.

4.2.2.2. Estabilizar o Escoamento

As perturbações de escoamento provocadas pela presença de acessórios tais como curvas, válvulas, tês, bomba, entre outros, pode afetar a exatidão de alguns contadores e caudalímetros [13]. É no sentido de atenuar esses efeitos que existe a necessidade de: colocar troços retos de tubagem a montante do contador/caudalímetro a calibrar; ou instalar um estabilizador de escoamento.

4.2.3. Fazer Medições Experimentais

O laboratório onde está localizado o BE deve estar preparado para fazer a aquisição de dados experimentais e controlar as condições ambientais: temperatura, pressão e humidade. As condições devem manter-se o mais estabilizadas possível de maneira a não afetar o processo e encontrar-se entre valores estipulados.

4.2.3.1. Adquirir Dados

A aquisição de dados pode ser feita manualmente e deve ter lugar no início e no fim de cada ensaio. Deve ter-se em especial atenção ao início/fim do tempo, à leitura da balança e à leitura do contador/caudalímetro.

- **Medir Temperatura do Fluido**

A temperatura tem influência nas propriedades do fluido, nomeadamente na massa volumica. A medição da temperatura é importante para a correção do erro que a variação do volume possa causar no resultado final.

- **Medir Massa**

Sendo a calibração feita pelo método gravimétrico, a aquisição de dados relativamente à massa é muito importante. A balança deve ter uma resolução adequada, boa repetibilidade e reprodutibilidade.

- **Medir Tempo**

No que diz respeito à aquisição do tempo, esta deve ser feita com a maior precisão e exatidão possível, com vista a minimizar o erro e a incerteza da medição.

4.2.3.2. Monitorizar Condições Ambientais

Deve existir no local do ensaio os equipamentos necessários para monitorizar as condições ambientais: temperatura do ar, pressão atmosférica e humidade relativa.

4.3. Constrangimentos Funcionais de Projeto

No início do planeamento foram impostas limitações que foram tomadas como constrangimentos de projeto. Estes constrangimentos delimitam a liberdade do projetista na escolha de soluções.

4.3.1. Constrangimento Técnico

Sendo necessária a utilização de reservatórios, foi solicitada a utilização de dois reservatórios IBC com capacidade de 1000L em polietileno existentes no Laboratório de Volume e Caudal.

Foi ainda aconselhado a utilização de uma das bombas de água centrífugas existentes nas instalações do LVC, bem como uma das balanças.

4.3.2. Constrangimento Financeiro

Neste projeto, como em qualquer outro, existiu um limite ao orçamento, definido pelo Laboratório de Volume e Caudal que também condicionou a escolha dos equipamentos.

4.3.3. Constrangimento Temporal

O projeto esteve em curso um ano, a duração correspondente ao estágio curricular feito na instituição IPQ. Neste espaço temporal decorreu a formação em metrologia, a pesquisa bibliográfica, assim como a idealização e o desenvolvimento do projeto.

4.3.4. Constrangimento Dimensional

A instalação do BE deverá ser feita numa sala do LVC. Nesta sala são calibradas massas Padrão M1 e recipientes graduados entre 100 L e 5000 L, utilizando o método gravimétrico e o método volumétrico, através de padrões calibrados – Figura 4.3.



Figura 4.3 - Reservatórios Padrão de 1000 litros e 200 litros

Existe a intenção, por parte do IPQ, de construir uma plataforma metálica, representada na Figura 4.4, que permita elevar os recipientes padrão. Para além de uma melhor organização e aproveitamento do espaço, será possível calibrar recipientes de clientes pelo método volumétrico de forma segura e mais expedita. Surgiu então a necessidade de posicionar a balança próxima da estrutura metálica para facilitar o processo de calibração pelo método gravimétrico.

Deste modo, o planeamento do *layout* entre a balança, a estrutura metálica e o BE foi crucial para o desenvolvimento do projeto. O *layout* estabelecido pela equipa, bem como as dimensões do espaço, estão representadas em planta na Figura 4.5.

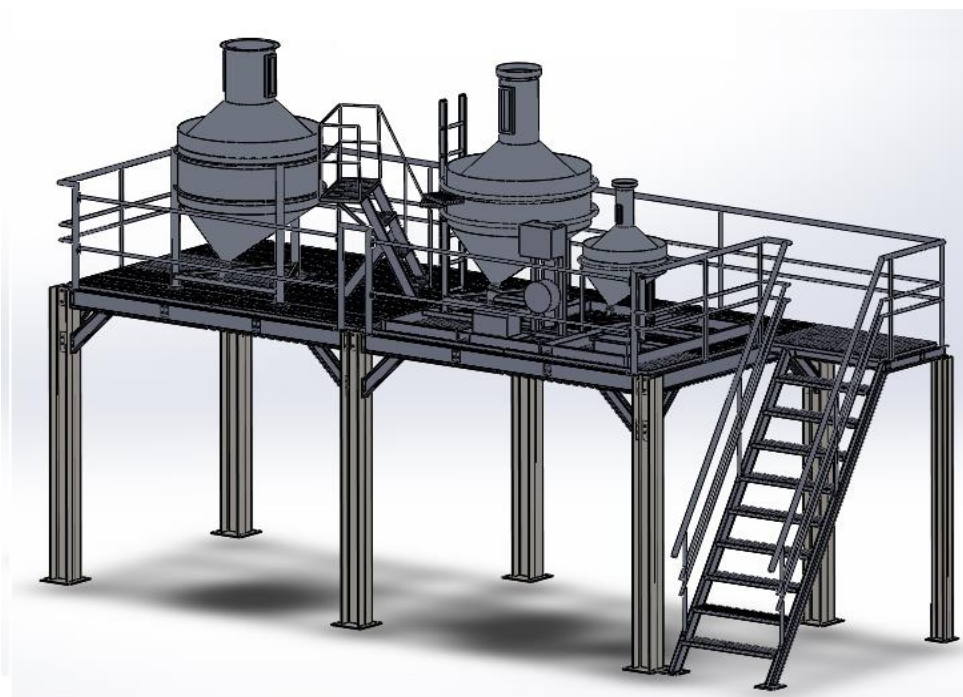


Figura 4.4 - Plataforma metálica para colocação de reservatórios Padrão

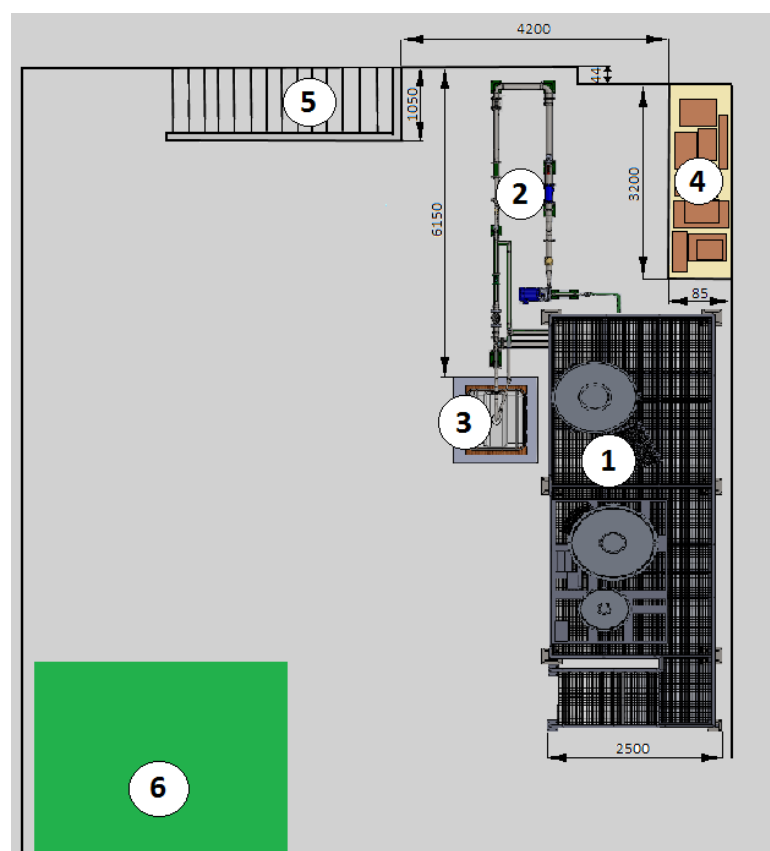


Figura 4.5 - Planta da zona de implementação do Banco de Ensaio. Legenda: (1) Estrutura metálica; (2) Banco de Ensaio; (3) Balança; (4) Zona de arrumações; (5) Escadas; (6) Zona do laboratório de massa

A Figura 4.6 apresenta o local (zona 2) onde será instalado o BE.



Figura 4.6 - Zona onde se fará a instalação do Banco de Ensaio

4.4. Parâmetros de Projeto

A determinação dos requisitos funcionais é por norma concebida por tentativas: pressupõe-se um conjunto de requisitos independentes e, em seguida, é feita uma análise para averiguar se estes constituem problemas cujas resoluções são possíveis e que possam satisfazer a necessidade. Os parâmetros de projeto são então um conjunto de requisitos capazes de constituir a resolução de problemas [33]. Cada DP representa a solução prática correspondente ao FR proposto.

4.4.1. Operar numa Ampla Gama de Caudal

A gama de caudal foi estabelecida de acordo com a intenção de calibrar contadores residenciais, comerciais e industriais. Preliminarmente, deliberou-se qual a gama de caudal que seria necessário para satisfazer o propósito, o que rondaria entre 20 L/h a 50000 L/h. Foram considerados estes valores de referência para idealizar o BE. Numa fase posterior do projeto dimensionou-se, efetivamente, qual o caudal que, na prática, seria possível executar tendo em conta as características e componentes da instalação.

4.4.1.1. Gerar Caudal

Foram analisadas 3 soluções possíveis para a geração de caudal. De entre as alternativas, a solução escolhida foi a bomba centrífuga.

- **Geração de caudal por efeito de gravidade**

A geração de caudal por efeito de gravidade foi a primeira solução proposta. Esta ideia parecia ser facilmente implementável, sendo apenas necessário colocar o reservatório de abastecimento a uma cota superior ao reservatório de recolha. Contudo, este método não permite controlar com facilidade a velocidade do escoamento e a pressão.

Outra dificuldade é a necessidade de atingir a pressão de 200 kPa (2 bar) na entrada do contador, que implicaria colocar o reservatório de abastecimento a uma altura de 20 metros.

- **Geração de caudal por efeito de diferença de pressão**

A intenção de utilizar os reservatórios existentes no LVC afastou a possibilidade de gerar caudal por efeito de diferença de pressão. Esta solução requer a utilização de um reservatório pressurizado que permita criar uma diferença de pressão e consequentemente gerar caudal. Esta solução seria dispendiosa devido à necessidade de existir um controlo de pressão rigoroso de forma a manter constante o valor do caudal e da pressão na entrada do DUT.

- **Bomba Centrífuga**

Um sistema de bombagem apresentou-se como sendo a melhor proposta para gerar o caudal. Uma bomba centrífuga permite gerar caudal e pressurizar o escoamento. A qualidade da turbomáquina determina a estabilidade destes parâmetros. Inicialmente pensou adquirir-se uma bomba centrífuga ajustada ao propósito; porém, foi reaproveitada uma bomba existente no LVC (Figura 4.7) aceitando as limitações que estas poderiam causar.



Figura 4.7 - Bomba centrífuga

À semelhança de algumas instalações vistas no subcapítulo 3.4, a regulação de caudal e pressão pode ser controlada através de um sistema PID, i.e., manter a pressão num ponto da linha através de um sensor de pressão ligado a um variador de frequência (variador de velocidade), que, por sua vez, comanda a velocidade de rotação da bomba. Assim, quando se fecha ou abre a válvula de regulação, o sistema reage no sentido de manter a pressão, respetivamente diminuindo ou aumentando a rotação da bomba. Contudo, este controlo não funciona bem para valores baixos de caudal, o que obrigou a repensar outra forma de controlar o caudal e a pressão. Assim, optou-se por manter a bomba centrífuga de velocidade fixa e implementar um sistema de *bypass* à bomba.

4.4.1.2. Regular o Caudal

- **Controlar o Caudal**

O sistema de *bypass* à bomba permite desviar parte do escoamento de volta ao tubo de aspiração e, deste modo, controlar o caudal que é direcionado para a linha principal. O controlo é feito por duas válvulas de regulação, uma localizada no *bypass* e outra na linha. A conjugação criada entre as duas válvulas irá estabelecer o valor de caudal que passará na linha principal.

Importa agora analisar os diferentes tipos de válvulas a utilizar:

Na zona do *bypass* uma válvula de globo (Figura 4.8) servirá o propósito, uma vez que a intenção é apenas fazer um ajuste grosso do caudal que irá para a linha principal. Na prática, o ajuste será depois complementado com a válvula situada na linha.



Figura 4.8 - Válvula de globo [35]

Fruto de diversas reuniões, foi definido que o que melhor se ajustava à linha principal era uma válvula de diafragma, devido ao facto de permitir um ajuste preciso do caudal. Esta foi a razão da sua escolha, em comparação com válvulas de globo, de esfera ou borboleta em que o ajuste é mais grosseiro; por exemplo, a válvula de borboleta possui um disco que gira dentro do anel em torno de um eixo, tem uma área de secção de passagem em formato em “lua” que ao rodar levemente o volante implica uma grande variação no caudal. Pelo contrário, a válvula de diafragma como a da Figura 4.9, consiste num corpo tubular, em que uma membrana pressionada por um pistão, atuado manualmente por um volante, formam um diafragma que obstrui a passagem do líquido, como se pode ver na Figura 4.10. Este diafragma permite um bom ajuste da área de secção, consequentemente uma boa regulação de caudal. Esta válvula permite regular uma ampla gama de caudal, devido à sua dimensão [36].



Figura 4.9 - Válvula de diafragma [37]

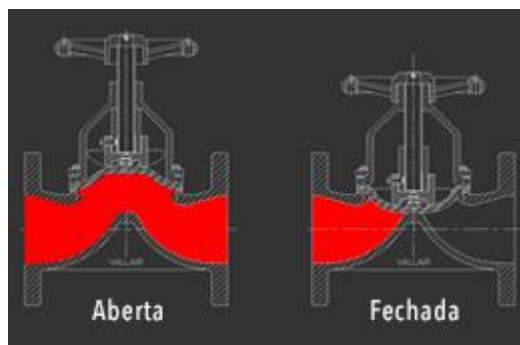


Figura 4.10 - Vista em corte de uma válvula de diafragma [38]

Do mesmo modo, para pequenos caudais, é preferível uma válvula de agulha como a da Figura 4.11. Estas válvulas são utilizadas normalmente em linhas de diâmetro inferior e permitem um ajuste muito preciso, esta precisão deve-se ao facto de possuir um obturador cónico com uma ponta bastante fina com espeto de agulha, como se pode ver na Figura 4.12 [39].



Figura 4.11 - Válvula de agulha [40]

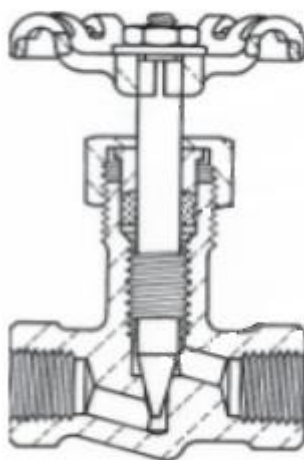


Figura 4.12 - Vista em corte de uma válvula de agulha [41]

▪ Ler o Caudal

Desde bem cedo, verificou-se uma necessidade relacionada com a regulação do caudal: conhecer o valor instantâneo deste. Foi um dos parâmetros que mais importância teve na concepção do projeto. Havia a inevitabilidade de ter um sistema de leitura que permitisse ser uma referência ao ajuste do caudal e abrangesse toda a amplitude, *a priori* estabelecida.

Assim, foi encontrada uma solução que satisfazia, parcialmente, o problema: um caudalímetro eletromagnético, Figura 4.13.



Figura 4.13 - Caudalímetro eletromagnético [42]

Este dispositivo é utilizado em medição de caudais em condutas fechadas, segundo o princípio físico de que o movimento de um líquido condutor que atravessa um campo magnético gera uma tensão elétrica aos seus terminais [43].

O caudalímetro cria um campo magnético perpendicular ao escoamento, permitindo inferir o caudal através de uma força eletromotriz (f.e.m) induzida, gerada pelo movimento do líquido no seio desse campo magnético [43].

O caudalímetro eletromagnético consiste num elemento primário e num secundário.

Elemento primário:

- Um tubo de medição eletricamente isolado, através do qual se escoar o líquido a medir;
- Um ou mais pares de eléctrodos diametralmente opostos, através dos quais é medido o sinal gerado no líquido;
- Um enrolamento indutor para produção do campo magnético no tubo de medição;
- O elemento primário gera um sinal proporcional ao caudal e, nalguns casos, também sinal de referência.

Elemento Secundário:

- Este equipamento possui um circuito que recebe sinal dos eléctrodos e os converte num sinal de saída normalizado, diretamente proporcional ao caudal. Este equipamento pode ser montado no elemento primário.

Apesar do elevado custo, o caudalímetro eletromagnético possui várias características que justificam a sua escolha, nomeadamente: ampla gama de medição; baixa perda de pressão, o que é ótimo para caudais elevados; o efeito de turbulência é desprezável; boa precisão e sensibilidade [43].

Segundo dados fornecidos pelo vendedor, o dispositivo seleccionado restringe-se a leituras em que a velocidade de escoamento não seja inferior a 0,4 m/s e superior a 10 m/s. Assim, determinando para a área de secção do aparelho de diâmetro nominal 50 (DN 50), resulta leituras de caudal entre 2,88 m³/h e 72 m³/h.

Uma vez que a gama estabelecida *a priori* era de 0,02 m³/h a 50 m³/h foi ainda necessário prever a leitura entre 0,02 m³/h e 2,88 m³/h. A opção mais rentável, visto que o

intervalo de caudal era relativamente pequeno, foi a utilização de caudalímetros mecânicos (Figura 4.14), um de menor dimensão com capacidade de leitura entre $0,02 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ e um de maior entre $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 4.14 - Caudalímetro mecânico (rotâmetro) [44]

Estes acessórios são constituídos por um tubo cónico, dentro do qual existe um flutuador ou bóia. Este tubo possui uma escala de medida onde se pode ler diretamente o valor de caudal. O fluxo entra na base e sai pelo topo do tubo, resultando num movimento axial do flutuador. Este movimento depende do caudal, sendo ascendente se o fluxo aumentar e descendente se o fluxo diminuir. No momento em que o caudal se mantém constante, a diferença de pressão que atua sobre o flutuador iguala o seu peso efetivo. Quando isso acontece o flutuador fixa-se numa posição onde pode ser lido o seu valor [45].

O princípio de funcionamento destes medidores baseia-se na força de arrasto que o fluido exerce sobre a bóia, móvel, dentro de uma secção variável de escoamento [45].

O seu preço atrativo, medição exata para valores mais baixos de caudal, facilidade de leitura, montagem e limpeza, foram as principais razões da sua escolha [45].

4.4.1.3. Regular a Pressão

- **Controlar a Pressão**

À semelhança do que acontece no controlo do caudal (4.4.1.2.), a pressão é controlada através do sistema de *bypass* à bomba. O controlo é garantido por duas válvulas de regulação,

nomeadamente a localizada no *bypass* e na linha. Segundo o princípio de Bernoulli, as posições das válvulas permitem-nos estabelecer o valor desejado de pressão.

Na prática, a regulação do caudal influencia a pressão e a regulação da pressão influencia o caudal, o que torna esta solução uma **solução acoplada**. Isto representa uma dificuldade para o operador quando tenta estabelecer as condições desejadas de caudal e pressão, uma vez que necessita de sucessivas iterações até acertar a posição das válvulas.

▪ Ler a Pressão

A leitura é fundamental para o controlo das condições no interior da tubagem e é feita por 2 sensores de pressão (Figura 4.15).



Figura 4.15 - Sensor de pressão

A zona de medição é constituída por: troços de conduta de montante e de jusante, onde estão localizadas as tomadas de pressão e o aparelho que se pretende calibrar (DUT). Devem ser evitadas diferenças entre o diâmetro das ligações dos tubos e do DUT por poderem originar perturbações indesejadas no escoamento.

O sensor localizado na conduta a montante faz a leitura de pressão à entrada do DUT, e o localizado a jusante tem como função determinar a perda de pressão existente causada pelo mesmo. Deste modo os sensores de pressão devem estar devidamente localizados como está descrito em 4.4.2.2.

4.4.1.4. Condução do Fluido

Inicialmente, com objetivo de ser uma instalação simples e económica, selecionou-se um material que permitia essa configuração: tubagem em PPR (polipropileno). Contudo, com o

desenvolvimento da instalação verificou-se que esta solução não era a mais adequada, tendo sido escolhido como tubagem final, o aço inox.

O aço inox 304 apresenta características adequadas, tais como: resistência mecânica, facilidade de maquinação e soldadura, bem como boa resistência à corrosão, facilidade de limpeza e aparência higiénica. A alta durabilidade e o baixo rácio custo/benefício foram as razões para a escolha deste material.

A espessura da tubagem deve estar relacionada com a pressão de trabalho a que vai ser sujeita. Uma espessura subdimensionada pode colocar em risco a integridade da instalação e uma sobre espessura traduz-se numa despesa desnecessária.

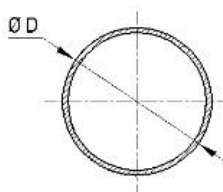
Na Figura 4.16, estão representadas as espessuras comerciais, sem costura, seleccionadas para os cálculos. A gama seleccionada foi ASTM Schedule 10S.

Tubo redondo sem costura - Gama Schedule ASTM

Qualidade: Aço inox AISI 304

Acabamento: Laminado a quente, 2B, baço

Comprimento: 6.000 mm



Diâmetro Nominal		Peso Teórico dos Tubos Kg/m							
Ø D (mm)		Schedule 5 S		Schedule 10 S		Schedule 40 S/STD		Schedule 80 S/XS	
Pol.	mm	Esp. (mm)	Peso Kg/m	Esp. (mm)	Peso Kg/m	Esp. (mm)	Peso Kg/m	Esp. (mm)	Peso Kg/m
1/2"	21,34	1,65	0,81	2,11	1,01	2,77	1,28	3,73	1,64
3/4"	26,67	1,65	1,03	2,11	1,30	2,87	1,71	3,91	2,23
1"	33,40	1,65	1,31	2,77	2,12	3,38	2,54	4,55	3,28
1 1/4"	42,16	1,65	1,67	2,77	2,73	3,56	3,44	4,85	4,53
1 1/2"	48,26	1,65	1,92	2,77	3,16	3,68	4,11	5,08	5,49
2"	60,33	1,65	2,42	2,77	3,99	3,91	5,52	5,54	7,59
2 1/2"	73,03	2,11	3,74	3,05	5,34	5,16	8,76	7,01	11,58
3"	88,90	2,11	4,58	3,05	6,55	5,49	11,46	7,62	15,5

Figura 4.16 - Espessuras comerciais de tubos (ASTM) [46]

4.4.1.5. Filtrar Partículas

Os ensaios dos contadores/caudalímetros devem ser realizados com água da rede pública de abastecimento ou que preencha os mesmos requisitos. A água utilizada para o ensaio não deve conter algo capaz de danificar a instalação e os seus componentes, em particular o DUT.

Na Figura 4.17, está representado o filtro utilizado na instalação que permite filtrar as partículas sólidas e sedimentos capazes de danificar os acessórios.



Figura 4.17 - Filtro [40]

4.4.1.6. Comutar o Escoamento

Com o método “*Flying-start-and-finish*” surge a necessidade de instalar um acessório que permita desviar o escoamento para o reservatório de pesagem no início da medição e para fora deste, no fim. A utilização de um defletor seria demasiado dispendioso para a finalidade, pelo que se preferiu uma válvula de 3 vias, atuada pneumaticamente.

Este acessório deve ter um tempo de manobra reduzido de modo a minimizar o erro e a incerteza de medição. Deve ter-se especial atenção à sincronização entre a comutação do escoamento, a leitura do tempo e do contador/caudalímetro a calibrar.

A discrepância entre o valor mais alto de caudal e o mais baixo levou à imposição de duas linhas: na linha dos grandes caudais é utilizada uma válvula de 3 vias (DN 80) T, flangeada e uma leitura de referência pelo caudalímetro eletromagnético; na dos pequenos caudais é utilizada uma válvula de três vias (DN40) T, roscada e uma leitura de referência dada pelos rotâmetros. Esta estratégia permite reduzir o tempo de ensaio.

As válvulas utilizadas são ilustradas na Figura 4.18, e o seu tipo de funcionamento na Figura 4.19.



Figura 4.18 - Válvulas de 3 vias com atuador pneumático [40]

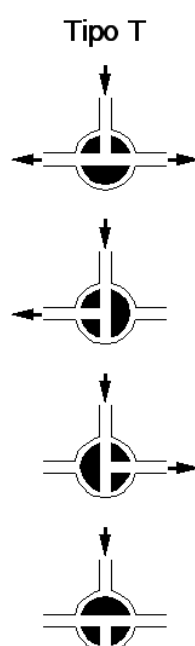


Figura 4.19 - Funcionamento de válvula de 3 vias T [47]

4.4.1.7. Ter Capacidade

Para fazer o abastecimento e a recolha de água, foram incorporados 2 depósitos no Banco de Ensaio. Aproveitaram-se os reservatórios de plástico IBC, existentes no LVC, idênticos ao da Figura 4.20. A sua característica transladável torna-os ideais para uma fácil montagem e desmontagem do BE, permitindo assim, um aproveitamento da balança para outras aplicações.

Características:

- Capacidade -1000 Litros
- Material - Polietileno

- Porta-paleta em plástico ou madeira
- Tampa roscada superior de 6" e válvula de esfera inferior
- Dimensões - (1,20 × 1,00 × 1,14)m



Figura 4.20 - Reservatório IBC 1000L

4.4.2. Universalizar o Banco de Ensaio

Em cooperação com a empresa JANZ foi delineado que o BE deveria ter capacidade para calibres DN 15, 20, 25, 32, 40, 50, 65, 80 o que corresponde a $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1, $1\frac{1}{4}$, $1\frac{1}{2}$, 2, $2\frac{1}{2}$, 3 em polegadas, respetivamente. Estes DN's compreendem aparelhos do tipo doméstico, comercial e industrial, como por exemplo os contadores JV400, JM300, MSV, MSV MID, MST, WPD, MEISTREAM, etc.

Outros aspetos que foram tidos em consideração para um BE generalizado foram o tipo de ligação aos DUT's e a zona de estabilização.

4.4.2.1. Fazer a Ligação

As extremidades de ligação são adaptadas de forma a permitir a instalação de qualquer aparelho, seja através de ligação roscada ou flangeada. As flanges são permutáveis e podem ser seleccionadas de acordo com o pretendido. A tubagem de ligação deve ter um diâmetro nominal igual ao do DUT.

A montagem e desmontagem do DUT é facilitada pela existência de um mecanismo que permite a extensão e redução da distância de ligação. O acessório representado pela Figura 4.21 admite uma variação de comprimento de 75 mm. Colocando dois acessórios de extensão, um em cada extremidade da ligação, consegue-se uma variação total de 150 mm, o que permite o

encaixe e o ajuste ao tamanho (comprimento) do DUT. Na Tabela 4.1 são indicados os comprimentos mínimos e máximos que os DUT's podem ter.



Figura 4.21 - Acessório de extensão [40]

Tabela 4.1 - Comprimentos de DUT possíveis de instalar

DN	Comprimento Mínimo (mm)	Comprimento Máximo (mm)
15	100	250
20	100	250
25	180	330
32	180	330
40	200	350
50	200	350
60	200	350
80	200	350

4.4.2.2. Estabilizar o Escoamento

A zona de estabilização surgiu da necessidade de atenuar as perturbações de escoamento provocadas pelos acessórios. A solução adotada foi a colocação de troços retos de tubagem a montante e a jusante do DUT. Segundo a Figura 4.22, as tomadas de pressão situam-se ao longo destes troços, que devem ter de comprimento 15 vezes o diâmetro interno da tubagem [13]. Na Tabela 4.2 calculou-se essa distância.

reservatório de pesagem e terminado no instante da comutação do escoamento na direção do reservatório de abastecimento. A medição da massa deve ser registrada antes e depois da recolha de líquido no reservatório de pesagem.

- **Medir Temperatura do Fluido**

É utilizada uma PT100 para medir a temperatura do fluido de calibração, com um alcance adequado ao intervalo da medição e deve estar previamente calibrado. Possui uma resolução igual ou melhor que $0,1^{\circ}\text{C}$ e uma incerteza inferior a $0,1^{\circ}\text{C}$.

- **Medir Massa**

A balança existente no LVC é a balança *Mettler Toledo KES1500* (Figura 4.23), com uma incerteza e resolução adequada ao projeto e devidamente calibrada. As propriedades técnicas da balança são descritas na Tabela 4.3:



Figura 4.23 - Balança

Tabela 4.3 - Propriedades técnicas da balança

Resolução	0,02	[kg]
Carga máxima	1500	[kg]
Tamanho da plataforma	1500x1500	[mm ²]
Intervalo de tara	0-1500	[kg]
Repetibilidade	0,02	[kg]
Linearidade	$\pm 0,05$	[kg]
Sensibilidade	$\pm 0,01$	[kg/K]
Peso mínimo de referência	2	[kg]

▪ Medir Tempo

No que diz respeito ao registo do tempo, este deve ser efetuado através de um cronómetro existente no LVC, idêntico ao ilustrado na Figura 4.24. O cronómetro tem uma resolução melhor ou igual a 1s e deve estar calibrado. Deve ser operado de maneira a existir uma sincronização entre o início/fim da contagem e a comutação do escoamento. O *timing* é determinante nesta operação uma vez que o *start/stop* é feito pelo operador.



Figura 4.24 - Cronómetro

4.4.3.2. Monitorizar Condições Ambientais

Manter as condições de temperatura, humidade e pressão do laboratório seria caro e difícil de implementar devido ao facto deste ser uma área transitável, extremamente ampla, com frequente presença de pessoas e equipamentos em funcionamento. Resta monitorizar as condições do espaço e verificar que estas se encontram dentro dos limites aceitáveis. Para isso dispõe-se de um termohigrómetro e de um barómetro.

Termohigrómetro: Instrumento utilizado para medir a humidade e a temperatura do ar, que deve estar devidamente calibrado. Para a humidade deverá possuir uma resolução melhor ou igual a 1% e uma incerteza inferior a 5%. Relativamente à temperatura, deverá possuir uma resolução melhor ou igual a 0,1°C e uma incerteza inferior a 0,1°C.

Barómetro: Instrumento utilizado para medir a pressão atmosférica, o qual deve estar calibrado. Deverá ter uma resolução inferior ou igual a 1 hPa e uma incerteza inferior ou igual a 2 hPa.

As condições ambientais devem satisfazer as seguintes condições de referência:

- Intervalo da temperatura ambiente: 15 °C a 25 °C
- Intervalo da humidade relativa ambiente: 45 % a 75 %
- Intervalo da pressão atmosférica ambiente: 86 kPa a 106 kPa (0,86 bar a 1,06 bar)

4.5. Composição Modelar do Projeto

O esquema da instalação da norma ISO 4185 [16], ilustrado na Figura 4.25, surgiu como ponto de partida à construção do BE. Este apresenta pontos-chave que foram fundamentais para dar resposta aos requisitos funcionais apresentados no subcapítulo 4.2 e ao próprio *layout* de construção. Desta forma, a modelação avançou no sentido de representar a instalação à dimensão real. Para isso utilizou-se um programa de Desenho Assistido por Computador 3D (*SolidWorks*).

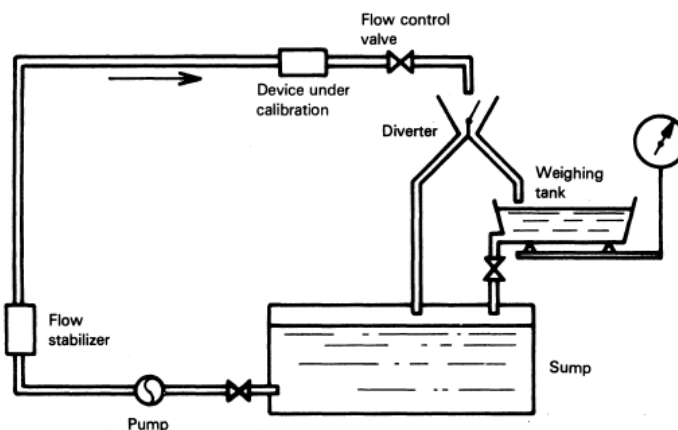


Figura 4.25 - Esquema instalação para calibração por pesagem - fornecimento por bombagem [16]

A Figura 4.26 representa a modelação 3D do Banco de Ensaio. De forma a explicar o funcionamento do mesmo, ampliou-se a imagem em diversas zonas.

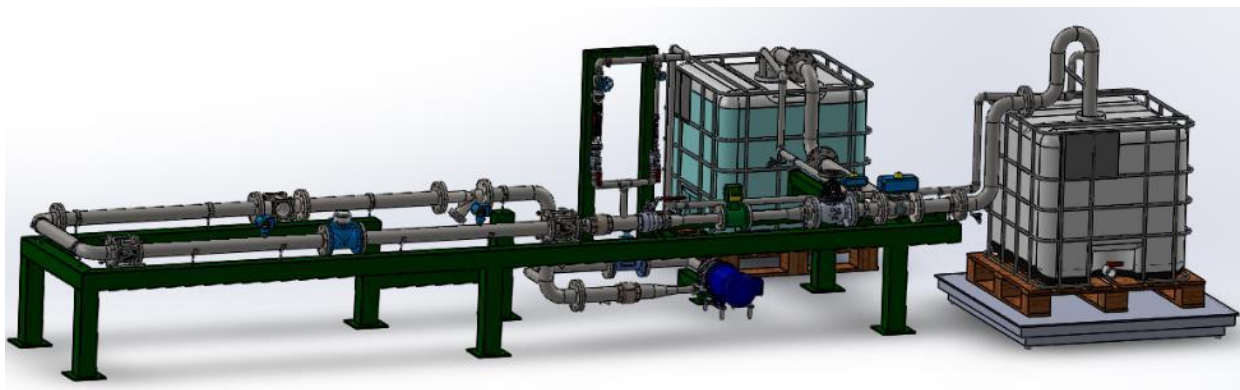


Figura 4.26 - Modelação do Banco de Ensaio completo

A zona inicial, ilustrada pela Fig 4.27, integra o reservatório de abastecimento, onde tem início o escoamento. A bomba centrífuga aspira a água do reservatório por via de uma mangueira flexível anelada PVC, gerando caudal na linha e pressurizando o fluido. O fluxo segue o sentido das setas azuis, representadas na Figura 4.27. A válvula de retenção é colocada a jusante da bomba centrífuga de forma a protege-la de um eventual refluxo ou golpe dinâmico que pode surgir devido ao fecho de uma válvula de regulação. O *bypass* à bomba é constituído por uma válvula de regulação de caudal e uma de segurança, que tem a função de protecção no que diz respeito à sobre-pressão na linha, permitindo um alívio quando esta ultrapassa os 0,5 MPa (5 bar).

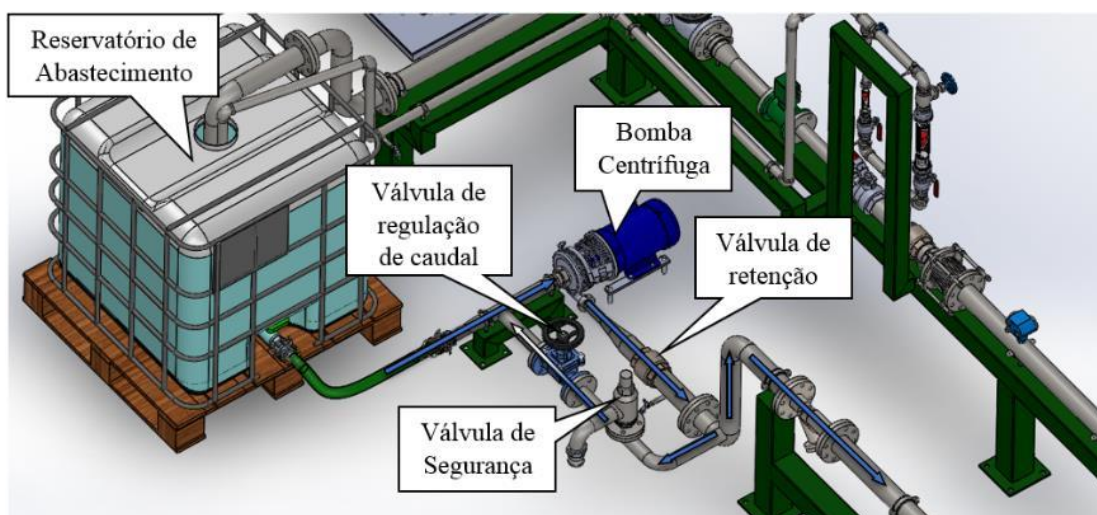


Figura 4.27 - Zona de bypass à bomba centrífuga

No seguimento da Figura 4.27, o filtro de partículas surge na linha (Figura 4.28), utilizado pelas razões apresentadas no sub-capítulo 4.4. O visor de escoamento, como o próprio nome indicia, tem como objetivo visualizar a situação do escoamento no interior da tubagem.

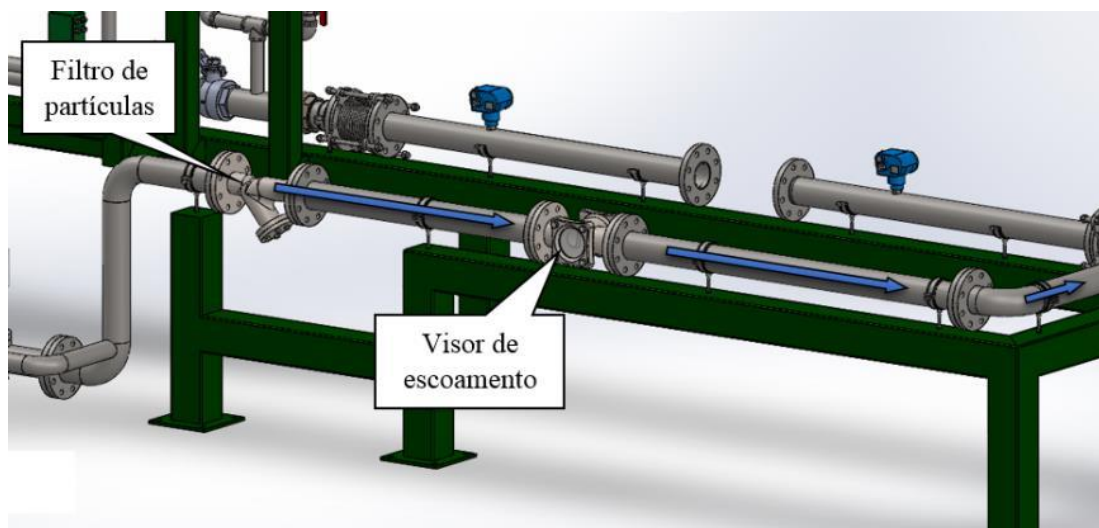


Figura 4.28 - Zona de filtro e visor de escoamento

Na Figura 4.29, zona do DUT, as juntas de expansão metálicas permitem a acomodação de qualquer dispositivo a calibrar através do ajuste do comprimento como se pode depreender pelas setas amarelas. Os troços retos permitem a instalação dos sensores de pressão.

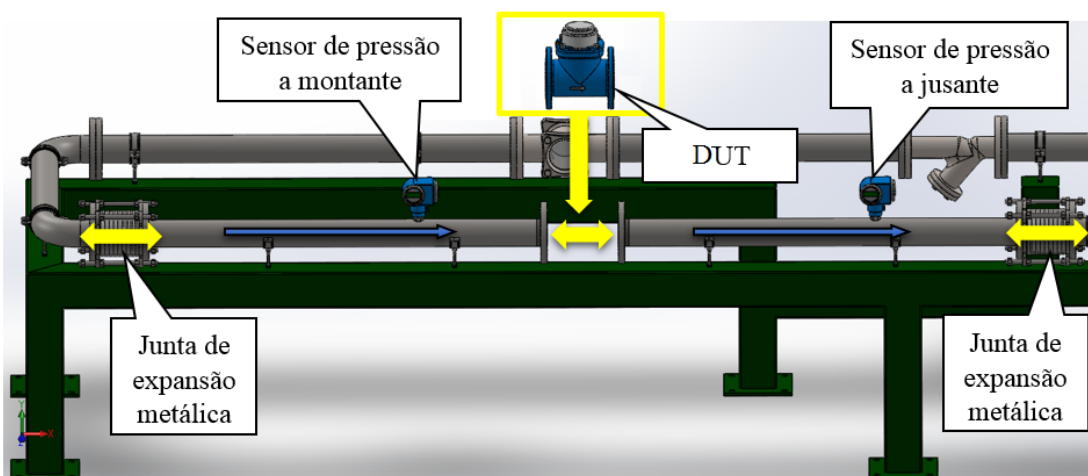


Figura 4.29 - Zona DUT- DN80

Outra particularidade do BE é a substituição dos troços retos a montante e a jusante do DUT, de acordo com o calibre do mesmo, nomeadamente DN80, 60, 50, 40, 32, 25, 20, 15. Na Figura 4.30 ilustra-se a substituição de troços DN80 para DN25. Para isso é necessário a desinstalação dos troços DN80, realizado através do desacoplamento da ligação flangeada com as juntas metálicas. Após isso, podem ser instalados os troços DN25, os sensores de pressão e o DUT como ilustrado na Figura 4.31.

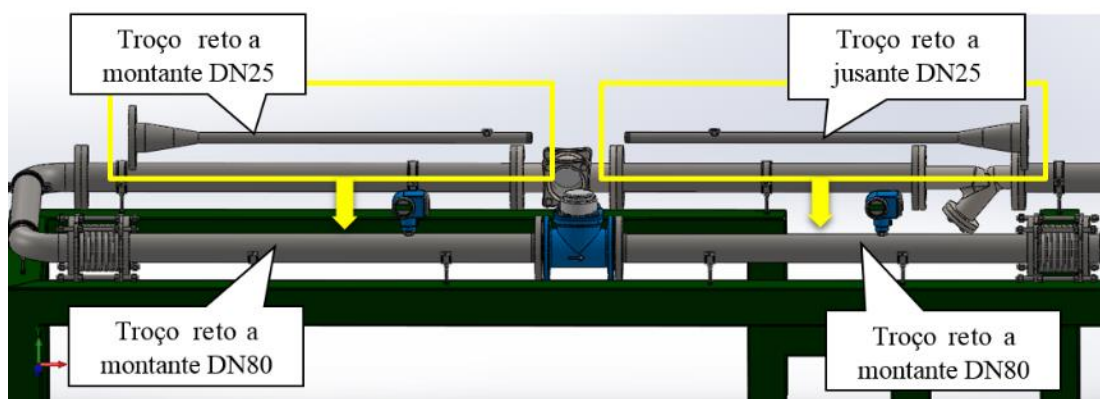


Figura 4.30 - Zona DUT- Substituição de troços

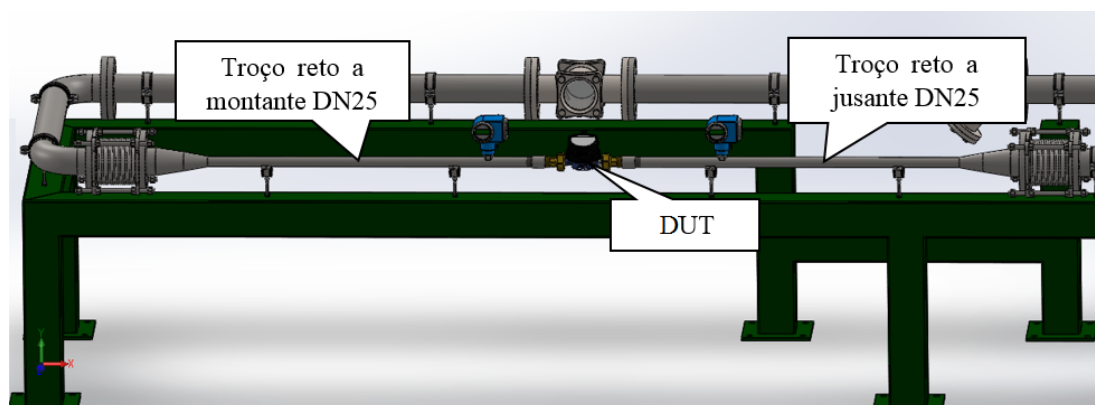


Figura 4.31 - Zona DUT- DN25

A leitura e regulação de caudal são feitas na zona representada pela Figura 4.32. Nesta zona, o fluxo pode migrar para 3 linhas diferentes, dependendo do valor de caudal que se pretende medir. Na linha I, o caudalímetro eletromagnético permite a leitura entre (2,88 a 72) m^3/h ; na linha II, o rotâmetro permite a leitura de (0,2 a 2,5) m^3/h e na linha III, de (0,02 a 0,25) m^3/h . Em cada uma delas está uma válvula reguladora de caudal que complementa a válvula de regulação localizada no *bypass*. Assinalado através de círculos vermelhos estão as válvulas de esfera que permitem conduzir o escoamento para a linha pretendida.

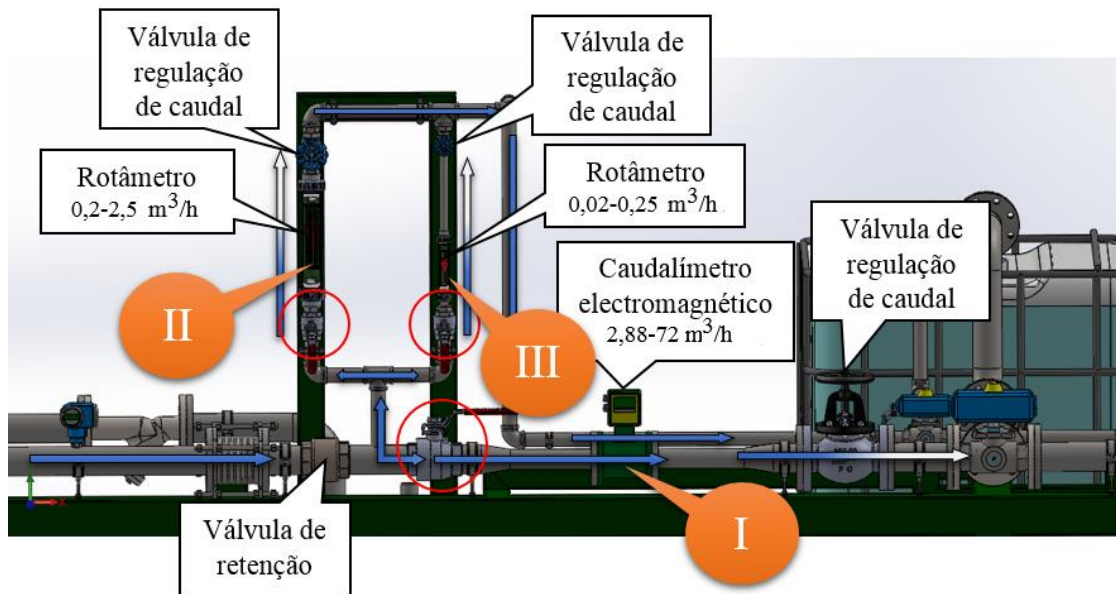


Figura 4.32 - Zona de leitura e regulação de caudal

A Figura 4.33 apresenta a zona onde é feita a comutação do escoamento. O fluido conduzido de volta ao reservatório de abastecimento (representado pelas setas azuis) forma um sistema em circuito fechado que tem como finalidade regular e estabilizar o caudal e a pressão. Após a estabilização dos parâmetros, a atuação das válvulas de comutação é essencial para conduzir o fluido para o reservatório de recolha (representado pelas setas amarelas). A existência de duas válvulas de comutação deve-se à sub-divisão de linhas para grandes caudais e pequenos caudais, ou seja, a linha I (grandes caudais) tem uma válvula de comutação, a linha II e III (pequenos caudais) tem outra.

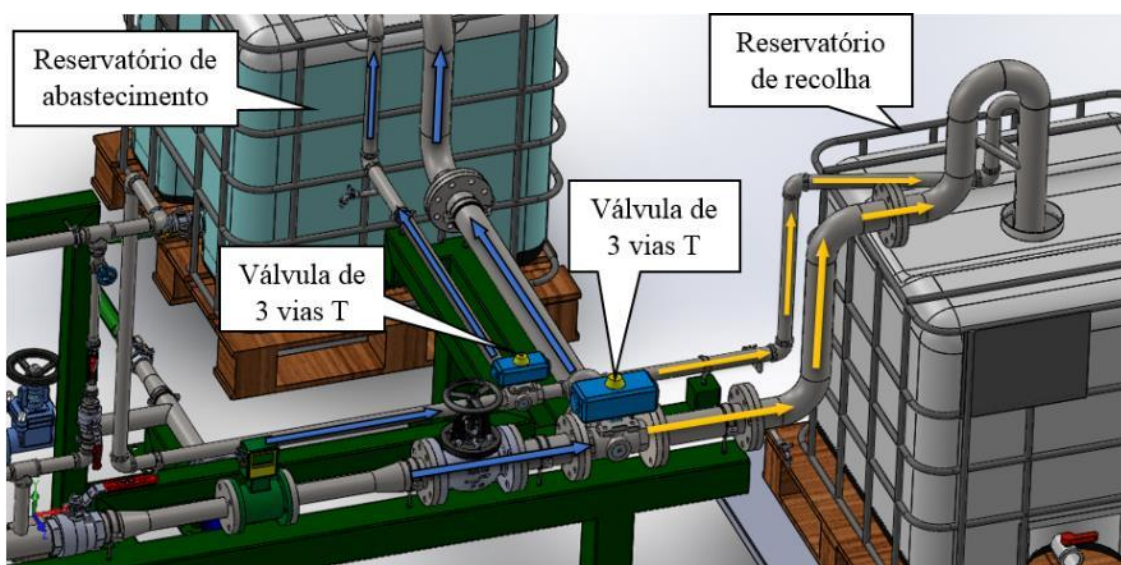


Figura 4.33 - Zona de comutação de escoamento

A zona de pesagem, ilustrada na Figura 4.34, engloba a balança, o reservatório de recolha e a tubagem com formato *gooseneck* (“pescoço de ganso”). A balança faculta a medição da quantidade mássica recolhida durante o ensaio; no entanto, existe uma quantidade de água que foi lida no DUT mas permanece na tubagem, não sendo contabilizada na balança. O integral dessa quantidade é dado pelo ponto imediatamente a jusante da válvula de comutação até ao escoador do *gooseneck*, como representado na Figura 4.34. O formato *gooseneck* garante não só o total preenchimento do tubo, como assegura a condição de repetibilidade do resultado.

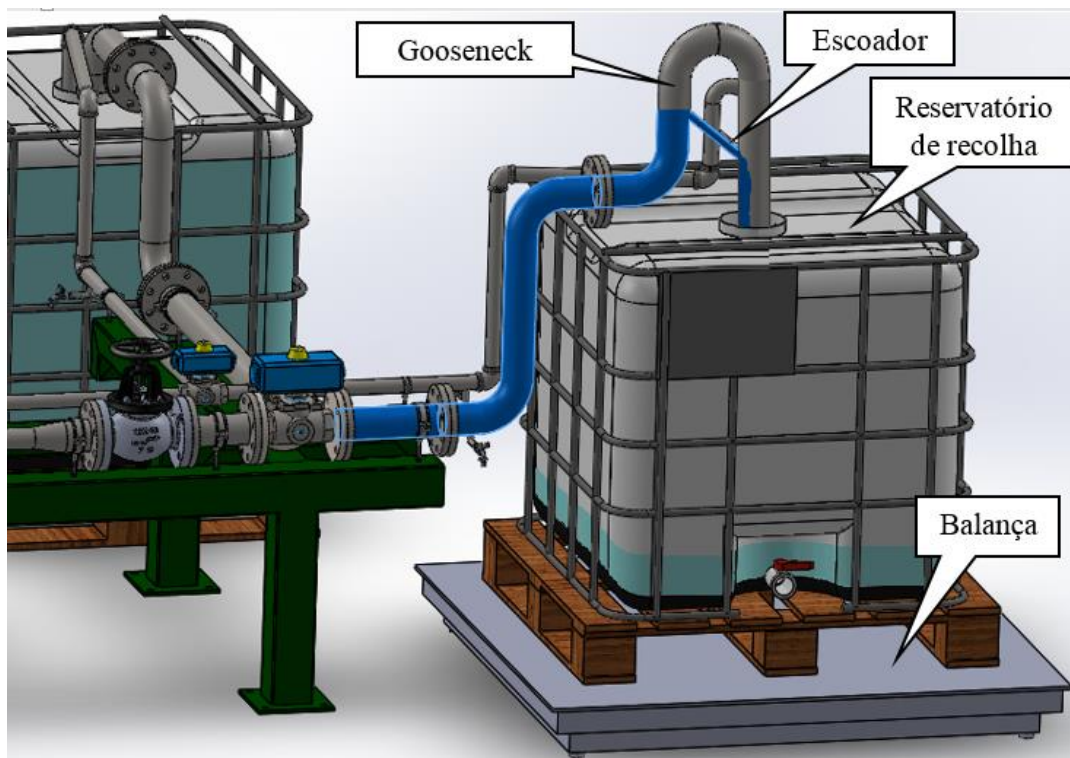


Figura 4.34 - Zona de pesagem

De forma a compreender melhor o funcionamento e a finalidade do *gooseneck*, foi apresentado o seu funcionamento em 3 fases (Figura 4.35). Numa primeira fase, durante a recolha, o tubo encontra-se cheio. Na segunda fase, aquando da comutação, o escoamento cessa imediatamente no topo da curvatura, no entanto a agitação causada pela própria turbulência do fluido faz balancear esse nível, obtendo resultados aleatórios. Desta forma, na terceira fase, o escoador permite um descer suave e sem turbulência do nível da água, garantindo o mesmo resultado para todas as medições.

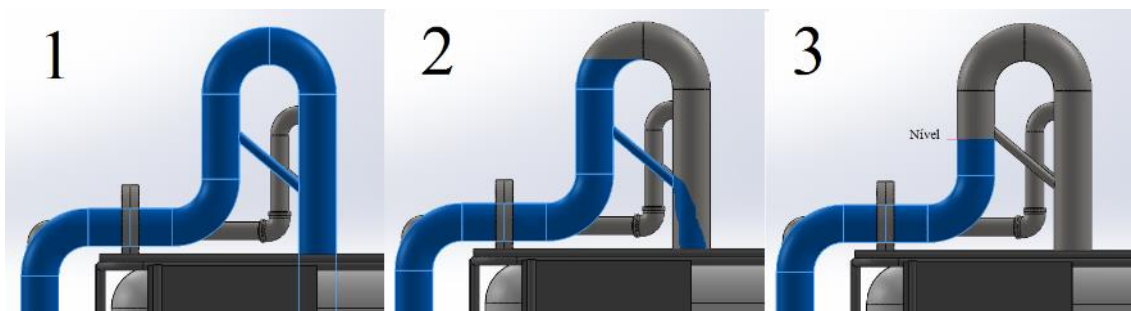


Figura 4.35 - Fases de gooseneck

Quando o fluxo se encontra no sistema em circuito fechado o nível de água no reservatório de abastecimento mantém-se inalterável, não havendo qualquer efeito pejorativo na capacidade de bombagem. Uma disfunção surge quando a comutação de escoamento é feita para o reservatório de recolha, onde a altura de coluna de água no reservatório de abastecimento diminui, afetando o caudal definido e estabelecido anteriormente.

Deste modo é necessário manter o nível de água no tanque de abastecimento de forma a garantir que o valor de caudal bombeado se mantém constante e estável. Para isso, a solução utilizada foi um terceiro reservatório, como se pode ver na Figura 4.36, que permite escoar por gravidade (Figura 4.37) a quantidade necessária para manter o reservatório de abastecimento ao nível pretendido, quando o escoamento está direcionado para o reservatório de recolha.

No final do ensaio e quando o reservatório de recolha se encontrar cheio ou sem capacidade para fazer outro ensaio, a quantidade de água coletada deve ser bombeada de volta ao terceiro reservatório com a ajuda de uma bomba centrífuga auxiliar, existente no IPQ.

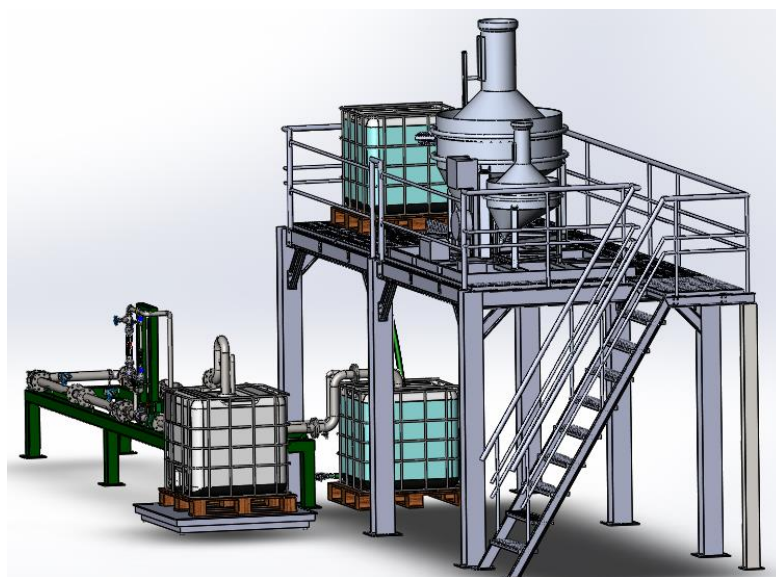


Figura 4.36 - BE e estrutura metálica

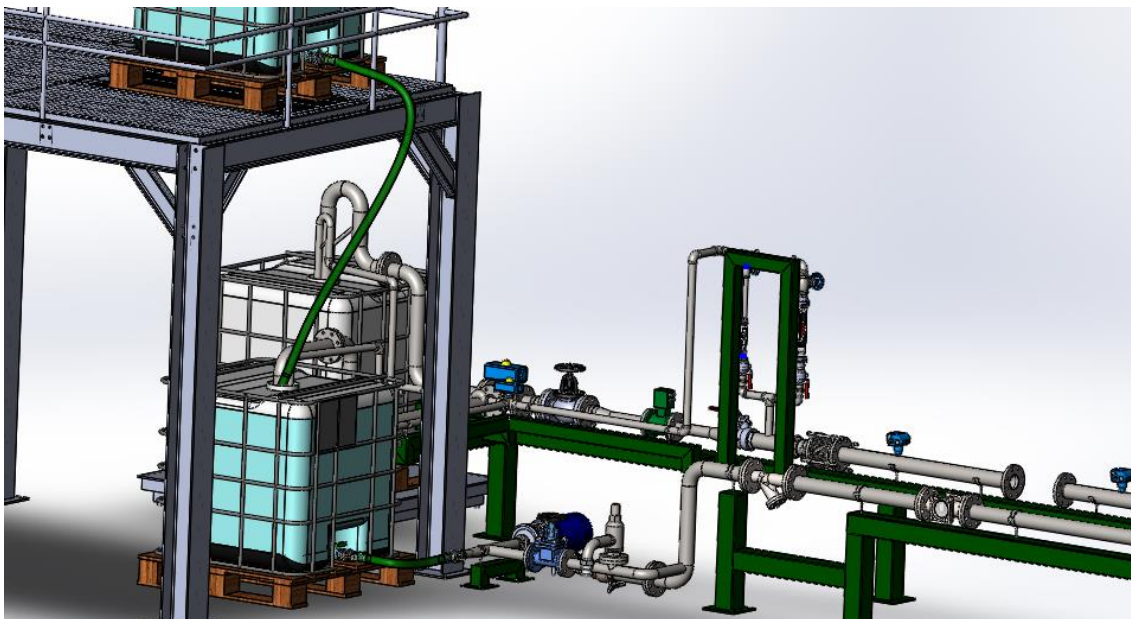


Figura 4.37 - Terceiro reservatório com escoamento por gravidade

4.6. Dimensionamento e Cálculos

4.6.1. Tubagem [48]

4.6.1.1. Pressão

Este dimensionamento consiste no estudo das tensões induzidas ao longo de um tubo pressurizado. Foi feito o cálculo da pressão máxima admissível (PMTA) utilizando a teoria geral de membrana, a teoria clássica de placas e o critério de Tresca.

Foram dimensionados os dois casos extremos de diâmetro (maior DN 80 e menor DN 15) da tubagem para os modelos característicos da instalação: casca cilíndrica e casca cônica.

A válvula de segurança existente no BE não permite um aumento de pressão além de 0,5 MPa (5 bar); contudo, considerou-se um coeficiente de segurança igual a 2 para a pressão, tendo sido considerado um limite superior de 1 MPA (10 bar).

Casca Cilíndrica

Para uma primeira aproximação, considerou-se o diâmetro exterior do tubo para efetuar os cálculos da espessura de tubos sujeitos a pressão interna. O diâmetro externo é fixo por convenção, ao contrário do diâmetro interno que varia para diferentes valores de espessuras

comerciais. Seguidamente, quando calculada a espessura têm-se condições para fazer o cálculo da pressão máxima admissível com o diâmetro interno.

Tubo DN 80 (3")

Com $\phi_{ext} = 88,9$ mm (Figura 4.38) vem:

$$\left[\begin{array}{l} r_0 = a \\ r_1 = \infty \\ r_2 = a \\ \phi = 90^\circ \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} r_0 = \frac{88,9}{2} \text{ mm} = 44,45 \text{ mm} \\ r_1 = \infty \\ r_2 = \frac{88,9}{2} \text{ mm} = 44,45 \text{ mm} \\ \phi = 90^\circ \end{array} \right]$$

Considerando um limite superior de pressão uniforme aplicada à casca cilíndrica do tubo de 10 bar de pressão.

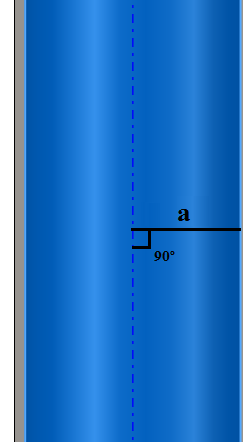


Figura 4.38 - Secção longitudinal de tubo

$$p_0 = 10 \text{ bar} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

A Equação 4.1 tem em conta a pressão imposta mais a pressão aplicada pela coluna de água com 1,8 metros de altura:

$$p_r = -(p_0 + \rho \times g \times h) \Leftrightarrow \text{Equação 4.1}$$

$$\Leftrightarrow p_r = -(1 \times 10^6 + 10^3 \times 9,81 \times 1,8) = -1017658 \text{ Pa} = -1,0177 \text{ MPa}$$

Aplicando a teoria geral da membrana:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = -p_r \\ N_\phi = -\frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \sin \phi} \end{array} \right. \Leftrightarrow \text{Equação 4.2 e 4.3}$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} N_\theta = -p_r \cdot r_2 \\ N_\phi = -\frac{-p_0 \cdot \pi \cdot r_0^2}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \sin \phi} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} N_\theta = -p_r \cdot r_2 \\ N_\phi = \frac{p_0 \cdot r_2}{2} \end{array} \right.$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} N_\theta = 1,0177 \times 44,45 = 45,24 \text{ N/mm} \\ N_\phi = \frac{1 \times 44,45}{2} = 22,23 \text{ N/mm} \end{array} \right.$$

Então,

$$\sigma_1 = \frac{N_\theta}{t} = \frac{45,24}{t}; \quad \text{Equação 4.4}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_\phi}{t} = \frac{22,23}{t}; \quad \text{Equação 4.5}$$

$$\sigma_3 = 0 \quad \text{Equação 4.6}$$

O material que constitui a tubagem é um aço inox AISI 304.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{adm} &= \frac{\sigma_{rot}}{2,5} = \frac{517}{2,5} = 206,8 \text{ MPa} \\ \sigma_{adm} &= \frac{\sigma_{ced}}{1,5} = \frac{206}{1,5} = 137,33 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \sigma_{adm} = 137,33 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.7 e 4.8}$$

Considera-se o valor menor da tensão admissível de modo a garantir, no final dos cálculos, um maior valor de espessura.

Aplicando o critério de Tresca:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm} \Leftrightarrow \frac{45,24}{t} - 0 = 137,33 \Leftrightarrow t = 0,33 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.9}$$

Confirmando este valor pela Norma **ASME**:

Garantido as condições de aplicabilidade (Equação 4.10):

$$P \leq 0,385 S.E = 0,385 \times \left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 \Leftrightarrow 1,0177 \text{ MPa} \leq 31,72 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde é $E = 0,6$ é o coeficiente de eficiência de soldadura correspondente a uma soldadura de junta topo a topo, com cordão feito de um só lado e sem cobrejunta, sem inspeção raio X, como se pode ver na Figura II.1 incluída no Anexo II.

Pela Norma **ASME, Sec. VIII, div. 1** tem-se a Equação 4.11:

$$t = \frac{P.R}{\sigma.E - 0,6P} = \frac{1,0177 \times 44,45}{\left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 - 0,6 \times 1,0177} = 0,55 \text{ mm} \rightarrow 3,05 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.11}$$

O valor obtido pela Norma **ASME** é aproximado ao valor obtido anteriormente ($0,33 \approx 0,55$). Uma vez que tubos com tais espessuras não existem no mercado é necessário redefinir o valor. Um valor retirado de catálogos que satisfaz a condição é 3,05 mm de espessura (DN 80-*Schedule 10S*).

Considerando a espessura de 3,05 mm, a pressão máxima admissível (PMTA) será:

$$PMTA = \frac{S.E.t}{R+0,6.t} = \frac{\left(\frac{206}{1,5}\right) \times 0,6 \times 3,05}{44,45+0,6 \times 3,05} = 5,43 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.12}$$

Como referido, em primeira aproximação foi necessário calcular a espessura utilizando a dimensão exterior do tubo. Com este processo iterativo está-se agora em condições de calcular a PMTA para o diâmetro interno.

Em que diâmetro interno:

$$\phi_{int} = \phi_{ext} - 2t \Leftrightarrow \phi_{int} = 88,9 - 2 \times 3,05 = 82,8 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.13}$$

$$PMTA = \frac{S.E.t}{R+0,6.t} = \frac{\left(\frac{206}{1,5}\right) \times 0,6 \times 3,05}{41,40+0,6 \times 3,05} = 5,81 \text{ MPa} = 58 \text{ bar} \quad \text{Equação 4.14}$$

Tubo DN 15 (1/2")

Com $\phi_{ext} = 21,34 \text{ mm}$ vem:

$$\left[\begin{array}{l} r_0 = a \\ r_1 = \infty \\ r_2 = a \\ \phi = 90^\circ \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} r_0 = \frac{21,34}{2} \text{ mm} = 10,67 \text{ mm} \\ r_1 = \infty \\ r_2 = \frac{21,34}{2} \text{ mm} = 10,67 \text{ mm} \\ \phi = 90^\circ \end{array} \right]$$

Vai-se considerar igualmente um limite superior de pressão uniforme aplicada à casca cilíndrica do tubo de 10 bar de pressão.

$$p_0 = 10 \text{ bar} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

A Equação 4.15 tem em conta a pressão imposta mais a pressão aplicada pela coluna de água com 1,8 metros de altura:

$$p_r = -(p_0 + \rho \times g \times h) \Leftrightarrow \quad \text{Equação 4.15}$$

$$\Leftrightarrow p_r = -(1 \times 10^6 + 10^3 \times 9,81 \times 1,8) = -1017658 \text{ Pa} = -1,0177 \text{ MPa}$$

Aplicando a teoria geral da membrana:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = -p_r \\ N_\phi = -\frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \sin \phi} \end{array} \right. \Leftrightarrow \quad \text{Equação 4.16 e 4.17}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} N_{\theta} = -p_r \cdot r_2 \\ N_{\phi} = -\frac{p_0 \cdot \pi \cdot r_0^2}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \sin \phi} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} N_{\theta} = -p_r \cdot r_2 \\ N_{\phi} = \frac{p_0 \cdot r_2}{2} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} N_{\theta} = 1,0177 \times 10,67 = 10,86 \text{ N/mm} \\ N_{\phi} = \frac{1 \times 10,67}{2} = 5,34 \text{ N/mm} \end{cases}$$

Então,

$$\sigma_1 = \frac{N_{\theta}}{t} = \frac{10,86}{t}; \quad \text{Equação 4.18}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_{\phi}}{t} = \frac{5,33}{t}; \quad \text{Equação 4.19}$$

$$\sigma_3 = 0 \quad \text{Equação 4.20}$$

Aplicando o critério de Tresca:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm} \Leftrightarrow \frac{10,86}{t} - 0 = 137,33 \Leftrightarrow t = 0,08 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.21}$$

Confirmando este valor pela Norma **ASME**:

Garantido as condições de aplicabilidade:

$$P \leq 0,385 \sigma \cdot E = 0,385 \times \left(\frac{206}{1,5}\right) \times 0,6 \Leftrightarrow 1,0177 \text{ MPa} \leq 31,72 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.22}$$

Temos então:

$$t = \frac{P \cdot R}{\sigma \cdot E - 0,6P} = \frac{1,0177 \times 10,67}{\left(\frac{206}{1,5}\right) \times 0,6 - 0,6 \times 1,0177} = 0,13 \text{ mm} \rightarrow 2,11 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.23}$$

O valor obtido pela Norma ASME é aproximado ao valor obtido anteriormente (0,08 \approx 0,13). Uma vez que tubos com tais espessuras não existem no mercado é necessário redefinir o valor. Um valor retirado de catálogos que satisfaz a condição é 2,11 mm de espessura (DN 15-*Schedule 10S*).

Considerando a espessura de 2,11 mm, ir-se-á ter uma pressão máxima admissível (PMTA) de:

$$\text{PMTA} = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0,6 \cdot t} = \frac{\left(\frac{206}{1,5}\right) \times 0,6 \times 2,11}{10,67 + 0,6 \times 2,11} = 14,57 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.24}$$

Em primeira aproximação calculou-se a espessura utilizando a dimensão exterior do tubo. Com este processo iterativo está-se agora em condições de calcular a PMTA para o diâmetro interno.

Em que o diâmetro interno:

$$\phi_{int} = \phi_{ext} - 2t \Leftrightarrow \phi_{int} = 21,34 - 2 \times 2,11 = 17,12 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.25}$$

$$PMTA = \frac{S.E.t}{R+0,6.t} = \frac{\left(\frac{206}{1,5}\right) \times 0,6 \times 2,11}{8,56 + 0,6 \times 2,11} = 17,7 \text{ MPa} = 177 \text{ bar} \quad \text{Equação 4.26}$$

Casca Cônica

Vai-se analisar o caso extremo, ou seja, o estreitamento cônico de diâmetro Nominal DN 80 para DN 15.

Ponto A:

Com $\phi_{ext} = 88,9 \text{ mm}$ (Figura 4.39) vem:

$$\left[\begin{array}{l} r_0 = a \\ r_1 = \infty \\ r_2 = \frac{a}{\sin \phi} \\ \phi \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} r_0 = \frac{88,9}{2} \text{ mm} = 44,45 \text{ mm} \\ r_1 = \infty \\ r_2 = \frac{44,45}{\sin 77,54} \text{ mm} = 45,52 \text{ mm} \\ \phi = 77,54^\circ \end{array} \right]$$

Ponto B:

Com $\phi_{ext} = 21,34 \text{ mm}$ vem:

$$\left[\begin{array}{l} r_0 = a \\ r_1 = \infty \\ r_2 = \frac{a}{\cos \alpha} \\ \phi \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} r_0 = \frac{21,34}{2} \text{ mm} = 10,67 \text{ mm} \\ r_1 = \infty \\ r_2 = \frac{21,34}{\cos 12,46} \text{ mm} = 21,85 \text{ mm} \\ \phi = 77,54^\circ \end{array} \right]$$

Calculando α e ϕ (ver Figura 4.40):

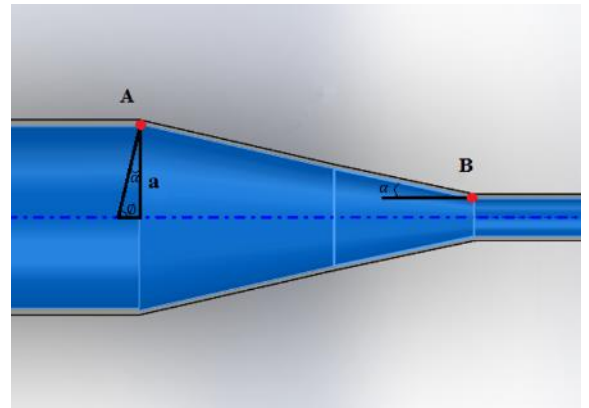


Figura 4.39 - Secção longitudinal de tubo com redução

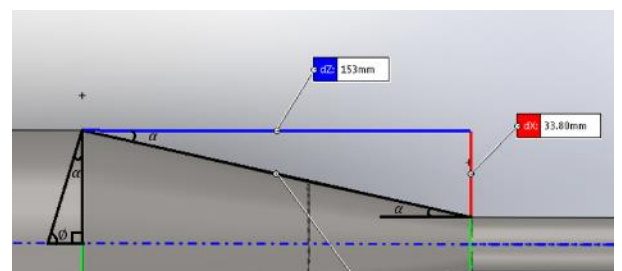


Figura 4.40 - Dimensões de tubagem

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{cateto oposto}}{\text{cateto adjacente}} = \frac{33,80}{153} \Leftrightarrow \alpha = 12,46^\circ$$

Equação 4.27

$$\phi = 180 - 90 - 12,46 = 77,54^\circ \quad \text{Equação 4.28}$$

Considerou-se um limite superior de pressão uniforme aplicada à casca cilíndrica do tubo de 10 bar de pressão.

$$p_0 = 10 \text{ bar} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

A Equação 4.29 tem em conta a pressão imposta mais a pressão aplicada pela coluna de água com 1,8 metros de altura:

$$p_r = -(p_0 + \rho \times g \times h) \Leftrightarrow \quad \text{Equação 4.29}$$

$$\Leftrightarrow p_r = -(1 \times 10^6 + 10^3 \times 9,81 \times 1,8) = -1017658 \text{ Pa} = -1,0177 \text{ MPa}$$

Aplicando a teoria geral da membrana:

$$\begin{cases} \frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = -p_r \\ N_\phi = -\frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \sin \phi} \end{cases} \Leftrightarrow \quad \text{Equação 4.30}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} N_\theta = -p_r \cdot r_2 \\ N_\phi = \frac{F}{2\pi \cdot r_0 \cdot \sin \phi} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} N_\theta = 1,0177 \times 45,52 = 46,33 \text{ N/mm} \\ N_\phi = \frac{1 \times 10^6 \times \pi \times 0,0445^2}{2\pi \times 44,45 \times \sin 77,54} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} N_\theta = 46,33 \text{ N/mm} \\ N_\phi = 22,81 \text{ N/mm} \end{cases}$$

Então,

$$\sigma_1 = \frac{N_\theta}{t} = \frac{46,33}{t}; \quad \text{Equação 4.31}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_\phi}{t} = \frac{22,81}{t}; \quad \text{Equação 4.32}$$

$$\sigma_3 = 0 \quad \text{Equação 4.33}$$

Aplicando o critério de Tresca:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{adm} \Leftrightarrow \frac{46,33}{t} - 0 = 137,33 \Leftrightarrow t = 0,34 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.34}$$

Confirmando pela Norma **ASME** tem-se a Equação 4.35:

com $\alpha \leq 30^\circ$

Para o ponto A:

$$t = \frac{P \times D}{2 \cos \alpha (SE - 0,6P)} = \frac{1,0177 \times 88,9}{2 \cos(12,46) \left(\left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 - 0,6 \times 1,0177 \right)} = 0,57 \text{ mm} \rightarrow 2 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.35}$$

$$PMTA = \frac{2.S.E.t.\cos \alpha}{D+1,2t.\cos \alpha} = \frac{2 \times \left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 \times 2 \times \cos 12,46}{88,9 + 1,2 \times 2 \times \cos 12,46} = 3,53 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.36}$$

Para o ponto B:

$$t = \frac{P \times D}{2 \cos \alpha (SE - 0,6P)} = \frac{1,0177 \times 21,34}{2 \cos(12,46) \left(\left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 - 0,6 \times 1,0177 \right)} = 0,14 \text{ mm} \rightarrow 2 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.37}$$

$$PMTA = \frac{2.S.E.t.\cos \alpha}{D+1,2t.\cos \alpha} = \frac{2 \times \left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 \times 2 \times \cos 12,46}{21,34 + 1,2 \times 2 \times \cos 12,46} = 13,59 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.38}$$

O valor obtido pela Norma **ASME** é aproximado ao valor obtido pela teoria geral da membrana. Uma vez que reduções com tais espessuras não existem no mercado é necessário redefinir o valor. Um valor retirado de catálogos que satisfaz a condição é 2 mm de espessura.

Igualmente ao que foi feito para a casca cilíndrica, está-se agora em condições de calcular a PMTA para o diâmetro interno:

Em que diâmetro interno:

$$\phi_{intA} = \phi_{extA} - 2t \Leftrightarrow \phi_{int} = 88,9 - 2 \times 2 = 84,9 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.39}$$

$$\phi_{intB} = \phi_{extB} - 2t \Leftrightarrow \phi_{int} = 21,34 - 2 \times 2 = 17,34 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.40}$$

$$PMTA = \frac{2.S.E.t.\cos \alpha}{D+1,2t.\cos \alpha} = \frac{2 \times \left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 \times 2 \times \cos 12,46}{84,9 + 1,2 \times 2 \times \cos 12,46} = 3,69 \text{ MPa} = 36,9 \text{ bar} \quad \text{Equação 4.41}$$

$$PMTA = \frac{2.S.E.t.\cos \alpha}{D+1,2t.\cos \alpha} = \frac{2 \times \left(\frac{206}{1,5} \right) \times 0,6 \times 2 \times \cos 12,46}{17,34 + 1,2 \times 2 \times \cos 12,46} = 16,35 \text{ MPa} = 163,5 \text{ bar} \quad \text{Equação 4.42}$$

4.6.1.2. Rosca

A roscagem é um processo de ligação não permanente que tem como objetivo a união de duas peças. A rosca tipo BSP (*British Standard Pipe*), também conhecida como rosca Gás ou rosca G, é comumente utilizada em tubulações domiciliares, prediais e industriais. A vedação é feita através do aperto dos filetes de rosca com adição de um vedante, normalmente teflon. A rosca BSP tem como característica o facto de a rosca exterior (do tubo) ser cónica (R) e a rosca interna (de conexão) ser cilíndrica (RP) [49].

A montagem de ligação processa-se em duas fases [50]:

1. Aperto manual (comprimento “a” indicado na Figura 4.41): sendo o comprimento de rosca necessário para, manualmente, colocar em contacto pleno a rosca exterior cónica com o primeiro fio da rosca interior cilíndrica.
2. Aperto com ferramenta (comprimento “b” indicado na Figura 4.41): correspondendo à zona da rosca onde se produz uma forte pressão de contacto metal-metal, entre os flancos da rosca exterior cónica e da rosca interior cilíndrica, utilizando-se a ferramenta e o binário de aperto adequados, originando a estanquidade da ligação.

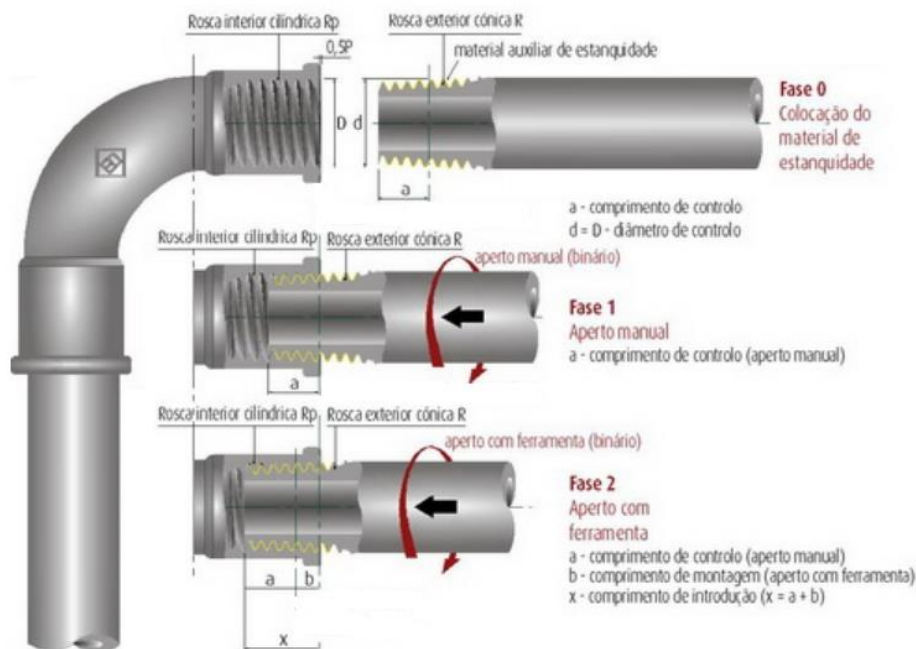


Figura 4.41 - Funcionamento da ligação rosca [50]

A Figura 4.42 apresenta os valores de comprimentos de aperto.

Dimensão da rosca R / R _p	Passo da Rosca P	Comprimento de aperto manual (rosca exterior)			Comprimento de aperto com ferramenta b		Comprimento de introdução x = a + b
		a	Tolerância				
"	mm	mm	mm	Nº voltas da rosca	mm	Nº voltas da rosca	mm
3/8	1,337	6,4	± 1,3	1	3,7	2 3/4	10,1
1/2	1,814	8,2	± 1,8	1	5,0	2 3/4	13,2
3/4	1,814	9,5	± 1,8	1	5,0	2 3/4	14,5
1	2,309	10,4	± 2,3	1	6,4	2 3/4	16,8
1 1/4	2,309	12,7	± 2,3	1	6,4	2 3/4	19,1
1 1/2	2,309	12,7	± 2,3	1	6,4	2 3/4	19,1
2	2,309	15,9	± 2,3	1	7,5	3 1/4	23,4
2 1/2	2,309	17,5	± 3,5	1 1/2	9,2	4	26,7
3	2,309	20,6	± 3,5	1 1/2	9,2	4	29,8

Figura 4.42 - Ligação roscada- cotas de montagem [50]

O comprimento de introdução da rosca exterior cônica “x” (indicado na Figura 4.42) é a soma dos comprimentos “a” e “b”. O material de estanquidade a ser utilizado na montagem de roscas destina-se unicamente a compensar as diferenças inevitáveis na fabricação do perfil teórico da rosca e a rugosidade das superfícies de contacto. De um ponto de vista mecânico, os eventuais esforços de tração, compressão ou flexão, são absorvidos pelo forte contacto metal-metal referido [50].

4.6.1.3. Flange

O processo de ligação por flanges consiste numa união mecânica entre duas extremidades circulares planas (as flanges) perpendiculares ao eixo da tubagem, sendo realizado através de um conjunto de parafusos dispostos num círculo e igualmente distanciados, cujo aperto origina a compressão de uma junta de vedação que assegura a estanquidade da união, como se ilustra na Figura 4.43. Este tipo de ligação destina-se a configurar uma união facilmente desmontável por via do desaperto e reaperto dos parafusos que a constituem [50].

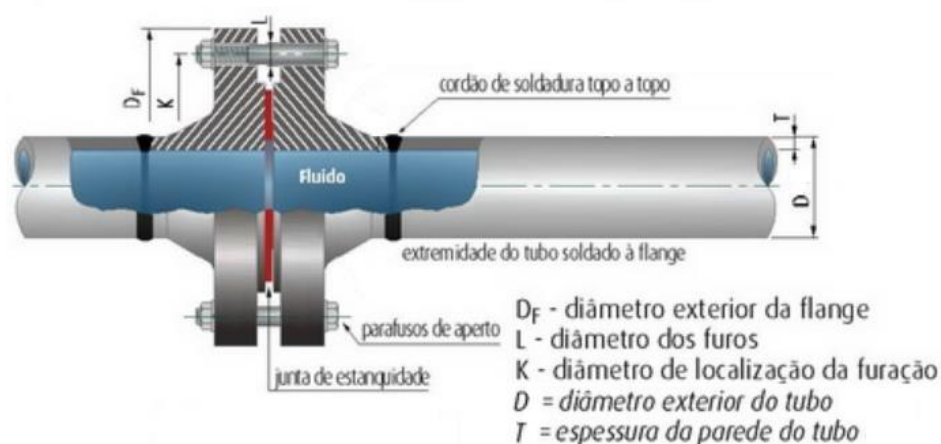


Figura 4.43 - Funcionamento da ligação flangeada [50]

4.6.1.4 Suporte

Os suportes devem localizar-se o mais próximo possível das cargas aplicadas, tais como válvulas, filtros, etc., de modo a minimizar as tensões induzidas por flexão decorrentes. Os suportes devem permitir eventuais contrações ou dilatações e possuírem, na zona anelar de contacto com a tubagem, um material elastómero ou similar, que impeça a transmissão à estrutura de vibrações produzidas pelo escoamento na tubagem. A Figura 4.44 expressa valores da Norma Americana ASME B31.1 para valores de espaçamento máximo entre suportes de tubagens em aço. Estes valores são baseados numa viga encastrada nos dois suportes com uma tensão de flexão admissível igual a 15,86 MPa, com o tubo isolado, cheio de água e uma flecha admissível entre os suportes de 2,5 mm a meio vão.

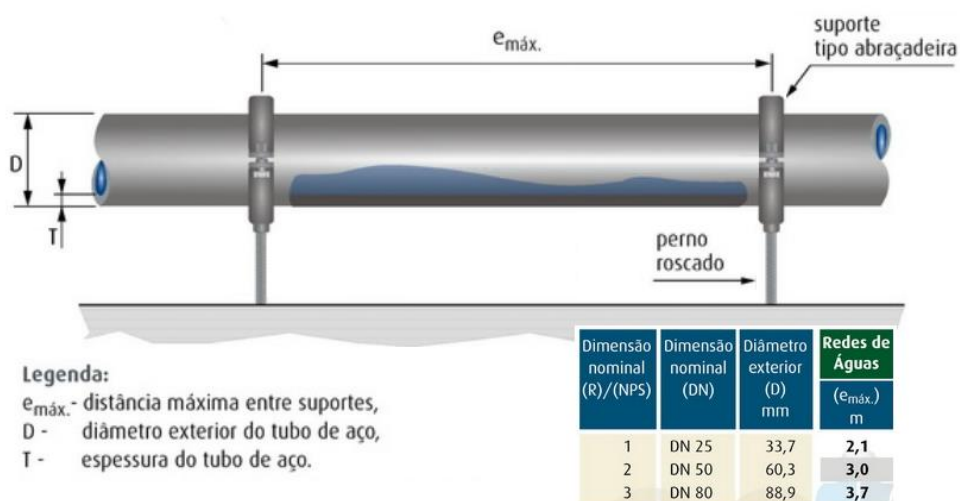


Figura 4.44 - Espaçamento máximo entre suportes de tubagem em aço [50]

4.6.2. Bomba Centrífuga para Geração de Caudal [48]

Numa instalação hidráulica, em condições normais de funcionamento e de maneira a conseguir um estudo aproximado, é razoável admitir que a massa volúmica do fluido, ρ , não sofre alterações significativas durante o escoamento. Interessa também considerar a situação mais comum, em que as condições de fronteira são praticamente invariáveis no tempo, o que corresponde a um escoamento estacionário.

Como se sabe da Dinâmica de Fluidos, se o escoamento for estacionário e a massa volúmica constante, a equação de conservação da energia para sistemas abertos (ou equação de Bernoulli generalizada) escreve-se:

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} + Z\right)_M + H_m = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} + Z\right)_J + \Delta H_{MJ} \quad \text{Equação 4.43}$$

Onde P , v e Z representam os valores médios da pressão, velocidade e cota, respetivamente. Os índices M e J referem as grandezas a uma secção a montante, S_M , e outra a jusante, S_J , e H_m é a variação de energia, por unidade de peso, que ocorre no fluido devido à existência de uma máquina. No caso de uma bomba, H_m é positiva e designa-se por altura de elevação.

Pretende-se abranger a instalação completa, as secções S_M e S_J são as suas extremidades de montante e jusante como, por exemplo, as superfícies livres em reservatórios de alimentação e de receção. Aí os valores de pressão e da cota são, em princípio, conhecidos. Na secção a montante, S_M , a velocidade de escoamento é considerada nula.

O termo H_m é característica própria de cada máquina e é geralmente expresso em função do caudal de volume, Q_V , e da sua velocidade de funcionamento.

O termo ΔH_{MJ} representa a perda de carga ao longo dos troços e pode ser expresso sob a forma genérica $\Delta H_{MJ} = \xi \frac{v^2}{2g}$ em que v é a velocidade média numa secção tomada como referência. ξ é dado por $4fL/D$ num troço em que o escoamento esteja completamente desenvolvido e numa singularidade tem um valor que é função da geometria e, eventualmente, do número de Reynolds, R_e .

Uma instalação é, em geral, constituída por associações de troços e interessa, agora, generalizar a informação apresentada para diferentes tipos de associações. Como a velocidade média de referência depende da área de secção reta de referência do troço considerado, é

preferível exprimir as perdas de carga em função do caudal em cada troço, relacionável com os caudais nos restantes troços pela equação de conservação de massa (ou da continuidade). Tendo em conta que na secção de diâmetro D , onde é tomada a velocidade de referência, v , verifica-se que $Q_V = v\pi D^2/4$, então vem que a perda de carga no escoamento completamente desenvolvido numa conduta denomina-se por perda de carga distribuída e é expressa pela Equação 4.44.

$$\Delta H_{MJ} = K_{distrib.} Q_V^2 = \frac{32fL}{g\pi^2 D^5} Q_V^2 \quad \text{Equação 4.44}$$

A que ocorre por variação brusca de geometria como, por exemplo, num acessório ou curva, chama-se perda de carga localizada, expressa pela Equação 4.45.

$$\Delta H_{MJ} = K_{local} \cdot Q_V^2 = \frac{8\xi}{g\pi^2 D^4} Q_V^2 \quad \text{Equação 4.45}$$

Q_V é o caudal volúmico e K é o coeficiente característico do troço para as condições de escoamento consideradas. O termo ξ é denominado por coeficiente de perda de carga singular e é retirado da Figura II.3 e Figura II.4 no Anexo II. O fator de atrito, f , é função do número de Reynolds, Re , e da rugosidade relativa, ε/D , sendo determinável por recurso ao diagrama de Moody, incluído no Anexo II, Figura II.5. L é o comprimento do troço e D o seu diâmetro interno.

4.6.2.1. Condições de Funcionamento de uma Instalação

Na determinação das condições de funcionamento de uma instalação deve ser conhecida a **curva característica de funcionamento da bomba**, tipicamente apresentada sob a forma gráfica, e a **curva característica da instalação**, determinada segundo as características da conduta que constituem a instalação e das condições nas extremidades.

Por norma, a curva característica de funcionamento da bomba é fornecida pelo vendedor, $H_m = \phi(Q_V, \omega)$ e apresentada graficamente em função do ω da bomba. Por esta razão, é corrente recorrer-se a processos gráficos para resolver o sistema. A curva característica de uma instalação com bomba representa uma função $H_{ex} = H_{ex}(Q_V)$ em que H_{ex} é denominada altura exigida e pode ser interpretada como a energia por unidade de peso que uma bomba teria de fornecer ao fluido para escoar um dado caudal de volume no sistema de condutas e, simultaneamente, satisfazer as condições nos limites. Deste modo, a curva da instalação é dada pela Equação 4.46:

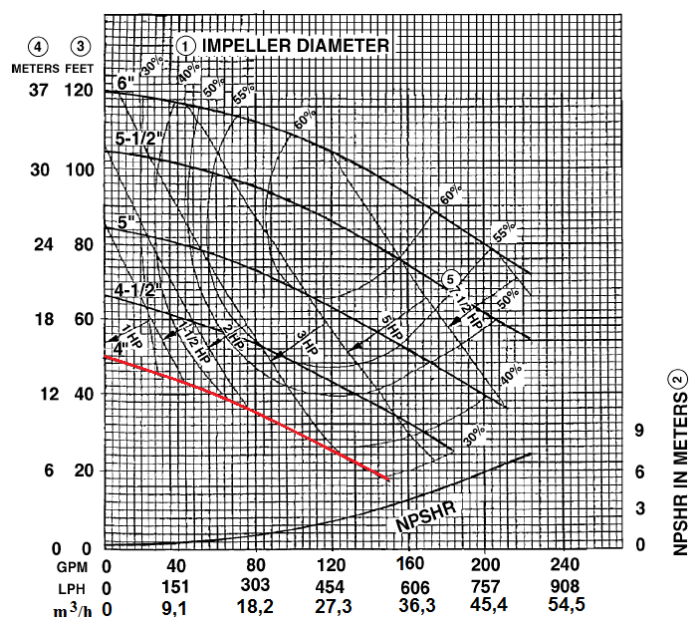
$$H_{ex} = \left(\frac{P}{\rho g} + Z \right)_J - \left(\frac{P}{\rho g} + Z \right)_M + \Phi(Q_V) = \Delta h + \Phi(Q_V) \quad \text{Equação 4.46}$$

Em que Δh é a diferença de alturas piezométricas entre as extremidades da instalação e, portanto, é independente de Q_V .

Assim, os valores do caudal de volume escoado numa instalação de bombagem e da energia por unidade de peso, que é necessário fornecer ao fluido para o escoar, são as soluções do sistema formado pelas Equações 4.46 e $H_m = \phi(Q_V, \omega)$ que, graficamente, definem o ponto de interseção da curva característica da instalação com a curva característica de funcionamento da bomba. Este ponto, designado por **ponto de funcionamento**, representa as condições de funcionamento da instalação.

4.6.2.2. Avaliação da Curva Característica de Funcionamento da Bomba

Segundo o catálogo de bombas centrífugas série “C” da marca *Waukesha Cherry-Burrel* *SPX – Flow* obteve-se a curva característica de funcionamento da bomba de que se dispõe no LVC, Figura 4.45 (Modelo C-216, 50 Hz e $\omega = 2900$ rpm, dimensão de admissão e saída de 2" e 1/2", respetivamente). As curvas são determinadas experimentalmente com água a temperatura de 22 °C para os vários tamanhos de rotor. Tratando-se no nosso caso de um impelidor de 4", identificámos a curva característica de funcionamento da bomba com a cor vermelha (Fig.4.43).



4.6.2.3. Avaliação da Instalação

Considerando o esquema ilustrado pela Figura 4.46, que representa o sistema simplificado e planificado da instalação hidráulica. Devido à existência da bomba, a água é aspirada do reservatório de abastecimento (1) e bombeada até ao reservatório de recolha (2) ou volta a ser descarregada no reservatório de abastecimento (1). A instalação conta com um *bypass* à bomba e com 3 troços paralelos (I, II, III), que nunca operam em simultâneo. A superfície da água no reservatório de abastecimento (1) encontra-se a 1 metro do chão e o seu tubo de descarga encontra-se mergulhado. A descarga para o reservatório de recolha é livre. A conduta é feita em aço inox AISI 304 e apresenta vários troços com diferentes diâmetros. Sabe-se ainda que curvas, reduções, ampliações e os acessórios são diversos e precisam ser analisados com detalhe. A simbologia encontra-se descrita no Anexo II, Figura II.2.

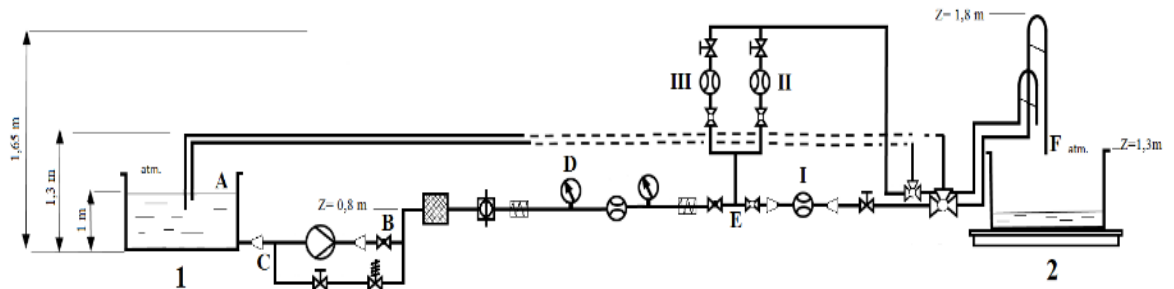


Figura 4.46 - Esquema Hidráulico

4.6.2.4. Caso de Estudo do Caudal Máximo

Sendo de interesse estudar o comportamento da instalação quando vários troços são associados, é pertinente analisar a situação correspondente à existência de caudal máximo. Esse caso dá-se quando a válvula do *bypass* se encontra totalmente fechada e a da linha E-I totalmente aberta. Considera-se ainda o maior diâmetro (DN 80) para o troço substituível.

A instalação é constituída por associações de troços e interessa apresentar a informação para os diferentes tipos de associações. Como a perda de carga depende da área de secção reta de referência do troço, exprimem-se os comprimentos dos troços, L , e os coeficientes de perda de carga singular, ξ , em função do diâmetro nominal. Vai-se admitir que o *bypass* se encontra fechado e considerar o troço de $A - B - D - (E)_I - F$. Ao longo deste troço tem-se tubagem de dimensão DN 80, 50 e 40.

Os comprimentos do troço $A - B - D - (E)_I - F$ estão apresentados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Comprimentos do troço $A - B - D - (E)_1 - F$

$L_{A-B-D-(E)_1-F}$	
L_{DN40}	1,7 m
L_{DN50}	1,5 m
L_{DN80}	12,8 m

Os coeficientes de perda de carga singular estão apresentados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Coeficientes de perda de carga singular do troço $A - B - D - (E)_1 - F$

ξ	DN40	DN50	DN80
Entrada com aresta viva	0,5		
Curva 90°	0,6		
Alargamento suave	0,023		
Alargamento suave	0,129		
Estreitamento suave		0,120	
Alargamento suave		0,120	
Curva 90°			0,6
Curva 90°			0,6
Curva 90°			0,6
Curva 90°			0,6
Curva 90°			0,6
Curva 90°			0,6
Válvula de retenção			5
Válvula de retenção			5
Filtro			10
Visor			0
Junta extensível (tubo flexível)			0
Curva 180°			0,4
Válvula de esfera			0
Contador eletromagnético			0
Válvula de diafragma			10
Válvula de esfera de 3 vias			0

Conhecendo esta informação, deve-se proceder ao cálculo do coeficiente característico do troço, K , para as perdas de carga distribuídas:

$$K_{distri} = \sum \frac{32fL}{g\pi^2 D^5} \quad \text{Equação 4.47}$$

É necessário determinar o fator de atrito, f , em função do número de Reynolds, Re , e da rugosidade relativa, ε/D , através do diagrama de Moody, incluído no Anexo II.

Admitindo-se $\varepsilon = 0,015$ mm, $D_{int\ DN40} = 42,72$ mm, $D_{int\ DN50} = 54,79$ mm e $D_{int\ DN80} = 82,8$ mm, obtêm-se os valores de rugosidade relativa inclusos na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 - Rugosidade relativa

$\varepsilon/D_{int\ DN\ 40}$	$\varepsilon/D_{int\ DN\ 50}$	$\varepsilon/D_{int\ DN\ 80}$
0,000351	0,000274	0,000181

$$e\ Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Equação 4.48}$$

Na Equação 4.48 é razoável considerar $\rho = 10^3$ kg/m³ e $\mu = 10^{-3}$ Pa.s

Após um processo iterativo, considerou-se um caudal de 28 m³/h para o cálculo do Número de Reynolds. Com $v = \frac{Q_v}{\frac{\pi}{4}(D_{int})^2}$, fica: $v_{DN\ 40} = 5,43$ m/s ; $v_{DN\ 50} = 3,30$ m/s ; $v_{DN\ 80} = 1,44$ m/s.

Na Tabela 4.7 está apresentado o cálculo do Número de Reynolds:

Tabela 4.7 - Cálculo do Número de Reynolds para os tubos DN40, DN50 e DN80.

$Re_{DN\ 40} = \frac{\rho \cdot v_{DN\ 40} \cdot D_{DN\ 40}}{\mu}$	$Re_{DN\ 50} = \frac{\rho \cdot v_{DN\ 50} \cdot D_{DN\ 50}}{\mu}$	$Re_{DN\ 80} = \frac{\rho \cdot v_{DN\ 80} \cdot D_{DN\ 80}}{\mu}$
231969,6	180807	119232

Através do diagrama de Moody retiraram-se os valores de f , apresentados na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 - Valores de f retirados do diagrama de Moody

$f_{DN\ 40}$	$f_{DN\ 50}$	$f_{DN\ 80}$
0,0045	0,0044	0,0046

Neste momento estamos em condições de substituir na Equação 4.47:

$$\begin{aligned}
 K_{distrib} &= \frac{32 \cdot f_{DN\ 40} \cdot L_{DN\ 40}}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{DN\ 40}^5} + \frac{32 \cdot f_{DN\ 50} \cdot L_{DN\ 50}}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{DN\ 50}^5} + \frac{32 \cdot f_{DN\ 80} \cdot L_{DN\ 80}}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{DN\ 80}^5} \\
 &= \frac{32 \times 0,0045 \times 1,7}{9,81 \times \pi^2 \times 0,04272^5} + \frac{32 \times 0,0044 \times 1,5}{9,81 \times \pi^2 \times 0,05479^5} + \frac{32 \times 0,0046 \times 12,8}{9,81 \times \pi^2 \times 0,0828^5} \\
 &= 27188,20 \text{ m}^{-5} \text{ s}^2
 \end{aligned}$$

e para as cargas localizadas tem-se a Equação 4.49:

$$K_{local} = \sum \frac{8\xi}{g\pi^2 D^4} \quad \text{Equação 4.49}$$

$$\begin{aligned}
 K_{local} &= \frac{8 \cdot \sum \xi}{g\pi^2 D_{DN\ 40}^4} + \frac{8 \cdot \sum \xi}{g\pi^2 D_{DN\ 50}^4} + \frac{8 \cdot \sum \xi}{g\pi^2 D_{DN\ 80}^4} \\
 &= \frac{8 \cdot (0,5 + 0,6 + 0,023 + 0,129)}{9,81 \cdot \pi^2 \cdot 0,04272^4} + \frac{8 \cdot (2 \times 0,120)}{9,81 \cdot \pi^2 \cdot 0,05479^4} \\
 &\quad + \frac{8 \cdot (7 \times 0,6 + 2 \times 5 + 2 \times 10 + 0,4)}{9,81 \cdot \pi^2 \cdot 0,0828^4} = 94097,64 \text{ m}^{-5} \text{ s}^2
 \end{aligned}$$

A perda de carga total do troço é expressa pela Equação 4.50:

$$\Delta H_{MJ} = (K_{local} + K_{distrib}) Q_V^2 \quad \text{Equação 4.50}$$

Calculando fica:

$$\Delta H_{MJ} = 121285,84 \cdot Q_V^2$$

Sabendo que a diferença de alturas entre a superfície da água no reservatório de abastecimento (1) e o tubo de descarga é de 0,3 metros e que ambas as extremidades se encontram à pressão atmosférica, está-se em condições de determinar a curva característica da instalação, segundo a Equação 4.51:

$$H_{ex} = \Delta h + \Phi(Q_v) = 0,3 + \frac{121285,84}{3600^2} Q_V^2 \quad \text{Equação 4.51}$$

Graficamente, a intersecção da curva característica de funcionamento da bomba com a curva característica da instalação traduz-se na resolução do sistema (Figura 4.47).

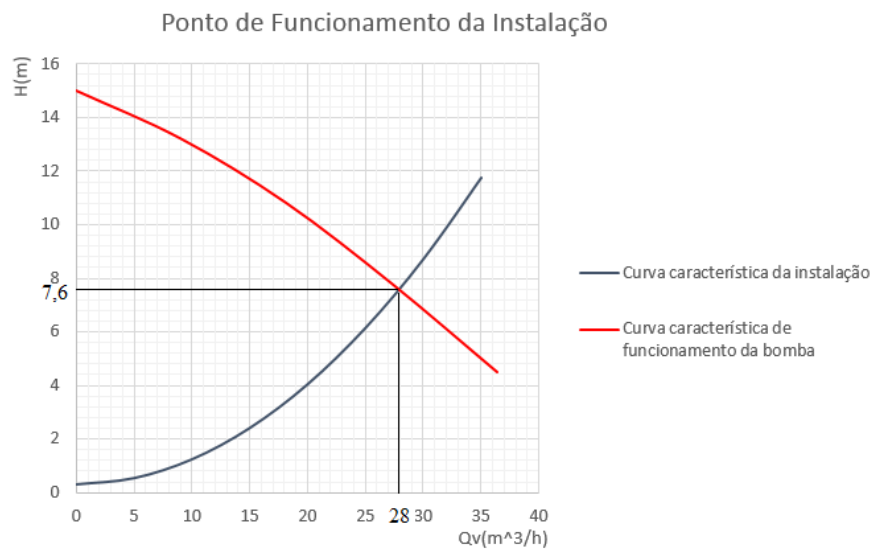


Figura 4.47 - Ponto de funcionamento da instalação

Com esta análise, garante-se um caudal máximo de aproximadamente 28 m³/h na instalação.

Calculando o trabalho da bomba para escoar os 28 m³/h de água para o reservatório:

$$\dot{P} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_V / \eta \quad \text{Equação 4.52}$$

Onde η é o rendimento da bomba.

$$\dot{P} = 10^3 \times 9,81 \times 7,6 \times \frac{28}{3600} / 0,3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{P} = 1,933 \text{ kW}$$

Fez-se o cálculo para verificar se existe ocorrência de cavitação na bomba. Para tal, considerou-se a pressão atmosférica $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$, a pressão de vaporização do líquido $P_V = 2500 \text{ Pa}$ à temperatura de 23°C e determinou-se um coeficiente característico do troço de aspiração, $K_{asp} = 47102,28 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$, calculado da mesma forma que no caso anterior mas considerando os comprimentos do troço de aspiração da Tabela 4.9 e os coeficientes de perda de carga singular da Tabela 4.10.

Tabela 4.9 - Comprimentos do troço de aspiração

L_{Asp}	
L_{DN40}	1,7 m
L_{DN50}	0,5 m

Tabela 4.10 - Coeficientes de perda de carga singular do troço de aspiração

ξ	DN40
Entrada com aresta viva	0,5
Curva 90°	0,6
Alargamento suave	0,023

Para atender às características do troço de aspiração, recorre-se à definição de altura disponível de aspiração, H_S , em função da pressão na superfície livre no reservatório de alimentação (pressão atmosférica) e da pressão de vaporização do líquido:

$$H_S = \left(\frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_V}{\rho g} \right) - (Z_M - Z_0) - \Delta H_{MJ} \Leftrightarrow \quad \text{Equação 4.53}$$

Onde Z_M é a altura da bomba e Z_0 a altura da superfície livre do reservatório de alimentação. Considerando uma diferença de alturas de 1 metro temos:

$$H_S = \left(\frac{10^5}{10^3 \times 9,81} - 0,25 \right) + 1 - \frac{47102,28}{3600^2} \times 28^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow H_S = 8,1 \text{ mca}$$

A capacidade que uma máquina tem de funcionar sem cavitare é determinável por ensaio experimental e quantificada pela altura disponível de aspiração crítica, H_{S_i} , (que na literatura anglo-saxónica é denominada “*net positive suction head (required)*”, NPSHR), definida como sendo o valor de H_S acima do qual a máquina não cavita. Para que não se verifique cavitação tem-se, portanto, que verificar a condição $H_S > H_{S_i}$. Uma vez que o valor de H_{S_i} é característico da bomba e é normalmente fornecido pelo fabricante, recorrendo à Figura 4.45 é possível retirar, para o valor de caudal de $28 \text{ m}^3/\text{h}$, um $H_{S_i} = 2,3 \text{ mca}$.

Visto que $H_S > H_{S_i} \Leftrightarrow 8,1 > 2,3$, pode-se concluir que a bomba não cavita.

4.6.2.5. Estudo da Pressão na Linha

Em relação ao troço estudado, $A - B - D - (E)_I - F$, importa ainda prever o valor aproximado de pressão que será indicado no leitor, sinalizado na instalação pelo **Ponto D**. Para isso foi utilizada a expressão que considera a equação de Bernoulli e a Primeira Lei da Termodinâmica. A equação de Bernoulli traduz o balanço das forças exercidas numa partícula de fluido que se move através de uma linha de corrente e a Primeira Lei da Termodinâmica consiste no balanço de energia entre os limites de um volume de controlo. Esta expressão permite analisar as trocas energéticas ao longo de uma corrente de fluido, tal como as perdas por fricção que retiram energia ao fluido ou uma bomba que adiciona energia ao fluido [52].

Deste modo, é necessário determinar a energia que a bomba fornece ao fluido, W_B .

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g h_A + W_B = P_F + \frac{1}{2} \rho v_F^2 + \rho g h_F + W_T + W_P \quad \text{Equação 4.54}$$

A pressão exercida em A e F é a pressão atmosférica. Sabe-se também que a velocidade em A é zero e que não existe perda de energia do fluido para uma turbina; simplificando fica:

$$\begin{aligned} \rho g h_A + W_B &= \frac{1}{2} \rho v_F^2 + \rho g h_F + W_P \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (10^3 \times 9,81 \times 1) + W_B &= \left(\frac{1}{2} \times 10^3 \times 1,44^2 \right) + (10^3 \times 9,81 \times 1,3) + W_P \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow W_B &= \left(\frac{1}{2} \times 10^3 \times 1,44^2 \right) + (10^3 \times 9,81 \times 1,3) + W_P - (10^3 \times 9,81 \times 1) \end{aligned}$$

W_P , corresponde às perdas de carga na conduta e representa a energia perdida pelo fluido ao longo da conduta:

$$W_P = W_{Plocalizadas} + W_{Pdistribuídas} \quad \text{Equação 4.55}$$

Onde:

$$W_{Plocalizadas} = \xi \times \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Equação 4.56}$$

$$W_{Pdistribuídas} = \frac{4f.L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Equação 4.57}$$

Na Equação 4.56, sendo os valores de ξ e L os mesmos que no caso anterior (4.6.2.4.) tem-se:

$$\begin{aligned}
W_{Plocalizadas} = & \left((0,5 + 0,6 + 0,023 + 0,129) \frac{1}{2} \times 10^3 \times 5,43^2 \right) \\
& + \left((0,120 + 0,120) \frac{1}{2} \times 10^3 \times 3,30^2 \right) \\
& + \left((7 \times 0,6 + 2 \times 5 + 2 \times 10 + 0,4) \frac{1}{2} \times 10^3 \times 1,44^2 \right) = 55833,99 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

O fator de atrito, f , é conhecido para o valor de caudal de $28 \text{ m}^3/\text{h}$, determinado em 4.6.2.4. (Tabela 4.8). Tem-se para a Equação 4.57:

$$\begin{aligned}
W_{Pdistribuídas} = & \left(\frac{4 \times 0,0045 \times 1,7}{0,04272} \frac{1}{2} \times 10^3 \times 5,43^2 \right) + \left(\frac{4 \times 0,0044 \times 1,5}{0,05479} \frac{1}{2} \times 10^3 \times 3,30^2 \right) \\
& + \left(\frac{4 \times 0,0046 \times 12,8}{0,08280} \frac{1}{2} \times 10^3 \times 1,44^2 \right) = 16134,69 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

O trabalho das perdas de carga é dado pela Equação 4.55:

$$W_P = W_{Plocalizadas} + W_{Pdistribuídas} = 71968,68 \text{ Pa}$$

Substituindo W_P na Equação 4.54 vem que:

$$\begin{aligned}
W_B = & \left(\frac{1}{2} \times 10^3 \times 1,44^2 \right) + (10^3 \times 9,81 \times 1,3) + 71968,68 - (10^3 \times 9,81 \times 1) \\
= & 75954,91 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

Conhecendo o trabalho da bomba, W_B , pode-se calcular qualquer valor de pressão ao longo da linha, bastando para isso considerar as perdas localizadas e distribuídas do troço que se analisa. Para o ponto D consideramos as perdas de carga do troço $A - B - D$ e um caudal de $28 \text{ m}^3/\text{h}$, ficando:

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g h_A + W_B = P_D + \frac{1}{2} \rho v_D^2 + \rho g h_D + W_P \Leftrightarrow \quad \text{Equação 4.58}$$

$$\Leftrightarrow P_B = P_A + \rho g h_A + W_B - \left(\frac{1}{2} \rho v_D^2 + \rho g h_D + W_P \right) \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned}
& \Leftrightarrow P_B = (10^5 + (10^3 \times 9,81 \times 1) + 75954,91) \\
& - \left(\left(\frac{1}{2} \times 10^3 \times 1,44^2 \right) + (10^3 \times 9,81 \times 0,8) + 49348,57 \right) = 127525,11 \text{ Pa} \\
& = 1,28 \text{ bar}
\end{aligned}$$

Assim, conclui-se que no sensor de pressão, a montante do contador, ter-se-á aproximadamente 1,28 bar de pressão.

Segundo a norma NP EN 14154-3 a pressão de trabalho da água poderá ser inferior a 200 kPa (2 bar), desde que a pressão seja mantida constante durante todo o ensaio e que se assegure que, no ponto mais alto do interior do contador/caudalímetro a calibrar, exista uma pressão positiva não inferior a 30 kPa (0,3 bar) [53].

4.6.3. Tempo de Enchimento

A capacidade do reservatório de recolha é uma limitação que deve ser analisada pelo risco de transbordo, nomeadamente para valores altos de caudal. Assim, importa conhecer a simples expressão analítica que traduz o tempo de enchimento em função do caudal.

Com um reservatório de capacidade volúmica de 1000 L, vem:

$$tempo = \frac{1000}{Q_V \cdot 10^3} \quad \text{Equação 4.62}$$

Onde:

tempo— Tempo de enchimento em segundos

Q_V – Caudal Volúmico, m^3/s

Na prática, é útil representar o tempo de enchimento em minutos e o caudal em m^3/h . Graficamente (Figura 4.48), obtém-se, como seria de esperar, uma curva com tendências assintóticas para 0 min à medida que o valor de caudal aumenta e para tempo infinito à medida que o valor de caudal diminui.

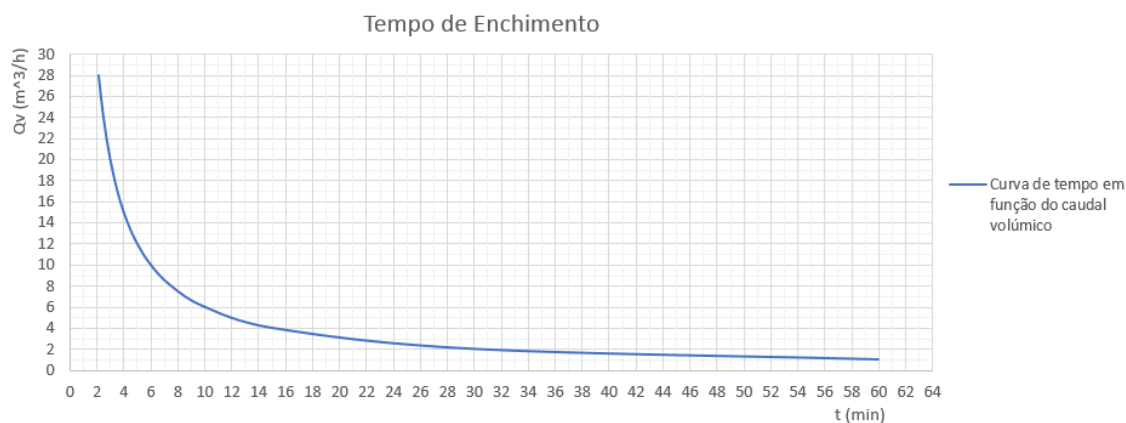


Figura 4.48 - Tempo de enchimento do reservatório de recolha

4.6.4. Orçamentos

A necessidade de comprar componentes para a construção do BE foi um aspeto importante na conceção do projeto. De modo a fazer uma análise técnica e financeira, foram consultados catálogos e pedidos orçamentos para conhecer as ofertas do mercado. Na Figura 4.49 é apresentado um quadro com os elementos selecionados e os respetivos valores:

Acessório	Empresa	Mail	Marca	série	Modelo	DN	Preço(euros)
Caudalímetro Electromagnético	CONTIMETRA	contimetra@contimetra.com	ISOMAG	Millenium	MS2500_P50-B1A1A/MV110-B0A1B1A	50	1.210,00 €
Conversor com precisão 0,2%	CONTIMETRA	contimetra@contimetra.com	ISOMAG	Millenium	ML210-B0A1B1A		270,00 €
Válvula de Diafragma Metálica	CONTIMETRA	contimetra@contimetra.com	GEMU		655/80/D53-8-14-0	80 (Flangeada)	399,00 €
Rotâmetro Plástico	CONTIMETRA	contimetra@contimetra.com	GEMU	800	807/R20/D7R-21-14-7-46-250 L/H	20 (união aço inox de roscar)	343,00 €
Rotâmetro Plástico	CONTIMETRA	contimetra@contimetra.com	GEMU	800	807/R32/D7R-21-14-7-62-2500 L/H	32 (união aço inox de roscar)	432,00 €
Válvula de agulha	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			20 (união de roscar)	75,86 €
Válvula de agulha	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			32 (união de roscar)	205,79 €
Filtro	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			80 (Flangeado)	673,75 €
Válvula de retenção	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			80 (União de roscar)	213,54 €
Válvula de retenção	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			80 (União de roscar)	213,54 €
Válvula de esfera 3 vias T	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			40 (União de roscar)	351,13 €
Válvula de esfera 3 vias T	SIEPI	joaopicarra@siepi.com				80 (Flangeada)	1.480,00 €
Junta Extensível	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			80 (Flangeada)	169,45 €
Junta Extensível	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			80 (Flangeada)	169,45 €
Visor	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			80 (Flangeado)	933,35 €
Válvula de segurança	VALCONTROL	geral@valcontrol.pt	VYC		Modelo 096	50 (Flangeda)	344,23 €
Válvula de globo	GENEBRE	barros7@sapo.pt	GENEBRE			50 (Flangeda)	241,39 €
TOTAL:							7.725,48 €

Figura 4.49 - Orçamento de material a comprar

O fabrico e a montagem da tubagem e da estrutura que a suporta ficam ao encargo de uma empresa ligada à indústria metalomecânica, cuja parceria com o IPQ é já duradoura e de boa fama. O orçamento pedido para produzir e implementar a instalação é de 11000,00 euros, o que, somado ao material a comprar, perfaz um total de 18725,48 euros.

5. CÁLCULO DE INCERTEZAS

Sempre que existe uma medição, existem um erro e uma incerteza associados. Dá-se o nome de erro à diferença entre o valor medido e um valor de referência, sendo que o valor medido é uma aproximação do valor verdadeiro [54].

Ao valor da medição está também inerente uma incerteza que deve ser avaliada e expressa segundo o *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement* - GUM [54], que estabelece princípios e requisitos de avaliação da incerteza de medição.

A ausência de um erro de medição exigia uma medição perfeita. Na prática é impossível um sistema de medição perfeito; a existência de erros é inevitável, sejam eles dependentes da exatidão humana, dos instrumentos utilizados ou das condições experimentais e podem ser de índole sistemática, aleatória ou grosseira [55].

Erros sistemáticos são erros que se mantêm de forma constante ou variam de forma previsível afetando a medição sempre no mesmo sentido, sejam eles para baixo ou para cima do valor real. Estes erros resultam de fatores imputáveis, nomeadamente dos instrumentos de medição, das condições ambientais e do procedimento [56].

Erros aleatórios são aqueles cujo efeito é imprevisível, associados à dispersão da mensurada em torno do valor real que não podem ser excluídos uma vez que não são controlados ou previsíveis, mas podem ser compensados segundo um tratamento de dados. Este tipo de erros resultam de causas variáveis e incontroláveis. Nem sempre se consegue identificar a causa dos erros por serem meramente irregulares e probabilísticos, contudo a melhor maneira de minimizar os seus efeitos será aumentar o número de medições e analisar estatisticamente os resultados de modo a possibilitar uma aproximação ao valor verdadeiro [56].

Erros grosseiros resultam de negligência humana, geralmente por utilização deficiente dos instrumentos, falta de formação ou de atenção do metrologista no procedimento [56].

O erro pode ser determinado segundo a Equação 5.1, em que o *VR* é o valor verdadeiro da grandeza ou valor de referência e *VM* o valor da mensuranda.

$$\varepsilon = VM - VR$$

Equação 5.1

5.1. Incerteza de Medição

A incerteza define-se por ser um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensurada a partir da informação usada [10]. O grau de confiança na medição está diretamente relacionado com a sua incerteza. i.e., o valor medido tem maior credibilidade científica quanto menor for a sua incerteza.

A incerteza de uma medição pode ser estimada e avaliada segundo o procedimento descrito no GUM [54] que refere os seguintes passos:

- Expressar em termos matemáticos a dependência da mensurada Y em relação às grandezas de entrada x_i ;
- Listar todos os componentes de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza (A ou B);
- Calcular a incerteza-padrão para cada componente de incerteza;
- Calcular os respetivos coeficientes de sensibilidade;
- Avaliar a necessidade de cálculo das covariâncias;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o fator de expansão k ;
- Determinar a incerteza expandida.

Geralmente numa calibração trabalha-se apenas com uma única mensurada ou grandeza de saída Y , que depende de um determinado número de grandezas de entrada, $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ de acordo com a relação:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 5.2}$$

Todas as grandezas de entrada têm uma incerteza associada e podem ser determinadas diretamente na medição ou advir de origens externas a esta. Para o primeiro caso é exemplo avaliações baseadas na experiência e em correções às indicações dos instrumentos; para o segundo caso, estamos a falar de grandezas associadas aos padrões de medição calibrados [57].

5.2. Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada

As componentes que estão associadas à incerteza de medição são avaliadas segundo dois tipos: O “tipo A” e o “tipo B” [56].

A avaliação de “tipo A” compreende a análise estatística de uma série de medições, que se traduz pelo desvio padrão experimental da média [56].

A avaliação de “tipo B” é um método baseado em meios que não os de análise estatística de uma série de medições. Pode ser caracterizado por desvio-padrão de funções de densidade probabilidade baseadas na experiência ou noutras informações [56].

5.2.1. Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão

A avaliação do tipo A pode ser utilizada quando são realizadas n observações estatisticamente independentes ($n > 1$) para uma das grandezas de entrada X_i , nas mesmas condições de medição. A média aritmética dos valores observados $q_j (j = 1, 2, \dots, n)$ é traduzida pela Equação 5.3 [54].

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 5.3}$$

A variância experimental $s^2(q)$ é uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade dos valores q_j e é dada pela Equação 5.4 [54]:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad \text{Equação 5.4}$$

A melhor estimativa da variância da média \bar{q} é a variância experimental da média e é dada pela Equação 5.5:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad \text{Equação 5.5}$$

A incerteza-padrão $u(X_i)$ da estimativa da grandeza de entrada \bar{q} é desvio-padrão experimental da média que se traduz pela raiz quadrada positiva da variância experimental da média $s^2(\bar{q})$ (Equação 5.6).

$$u(X_i) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 5.6}$$

5.2.2. Avaliação de tipo B da Incerteza-Padrão

A avaliação de tipo B compreende uma avaliação da incerteza-padrão baseada noutros meios que não os da análise estatística de uma série de medições [10]. A incerteza-padrão $u(x_i)$ é avaliada por apreciação científica com base em toda a informação acessível sobre a variabilidade de X_i . Ou seja, são considerados valores provenientes de [54]:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento, propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- Especificações de fabricantes;
- Dados provenientes de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais.

Uma avaliação do tipo B exige experiência e conhecimento específico para um uso adequado da informação disponível [56]. São aplicadas diferentes distribuições de probabilidades para diferentes tipos de valores: distribuição normal, retangular ou triangular.

5.2.2.1. Distribuição Normal

Quando a grandeza X_i é retirada de certificados de calibração, especificações de fabricantes ou de outras incertezas-padrão, a incerteza é obtida através da divisão desse valor de incerteza pelo valor do fator de expansão, k . A incerteza-padrão é calculada segundo a Equação 5.7 [54].

$$u(x_i) = \frac{\text{incerteza}}{k} \quad \text{Equação 5.7}$$

A distribuição normal é ilustrada na Figura 5.1 abaixo.

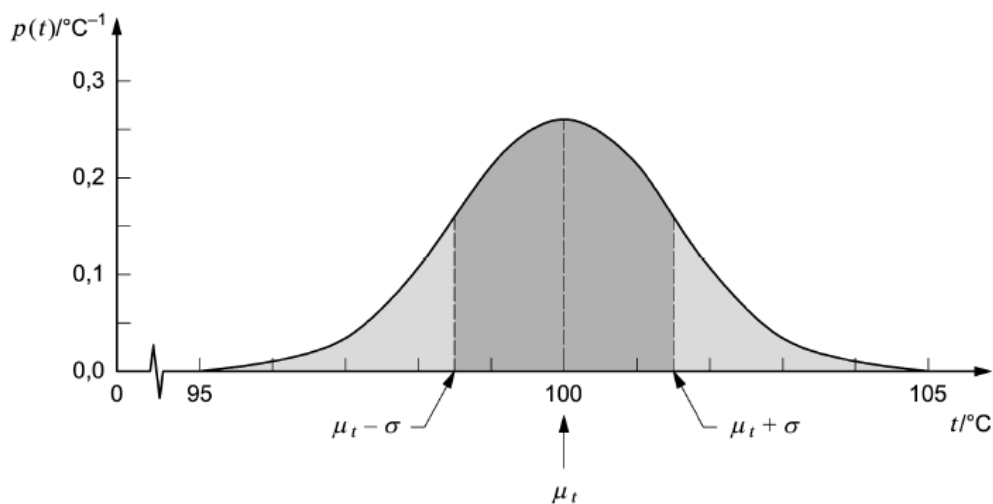


Figura 5.1 - Distribuição normal [54]

5.2.2.2. Distribuição Retangular

No caso de não haver conhecimento suficiente sobre os valores de X_i e apenas se conseguir estimar os valores dos limites inferior e superior, a_- e a_+ , respetivamente, aplica-se uma distribuição retangular (Figura 5.2). A incerteza-padrão é determinada segundo a Equação 5.8 [54].

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 5.8}$$

Caso a diferença entre os limites, $a_+ - a_-$, seja igual a $2a$, a Equação 5.9 substitui a Equação 5.8.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Equação 5.9}$$

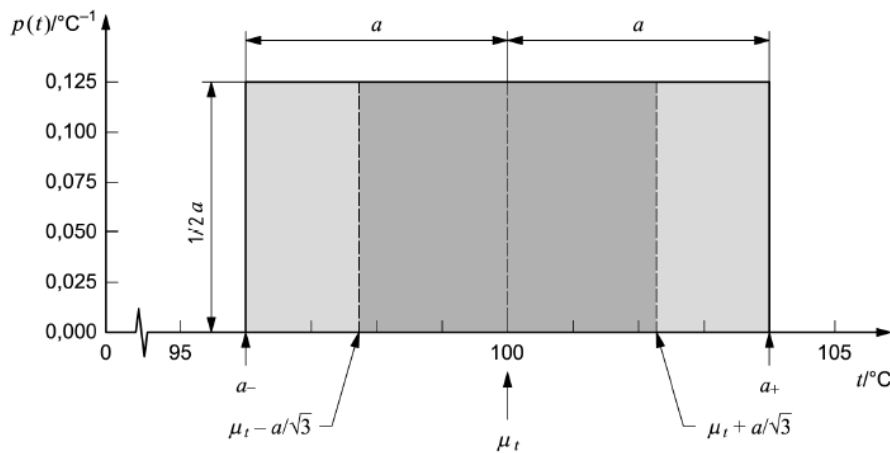


Figura 5.2 - Distribuição retangular [54]

5.2.2.3. Distribuição Triangular

Sempre que é esperado que os valores centrais da grandeza sejam mais prováveis que os valores dos limites deve-se utilizar uma distribuição triangular como é ilustrado na Figura 5.3 [54].

A sua incerteza-padrão é determinada segundo a Equação 5.10.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad \text{Equação 5.10}$$

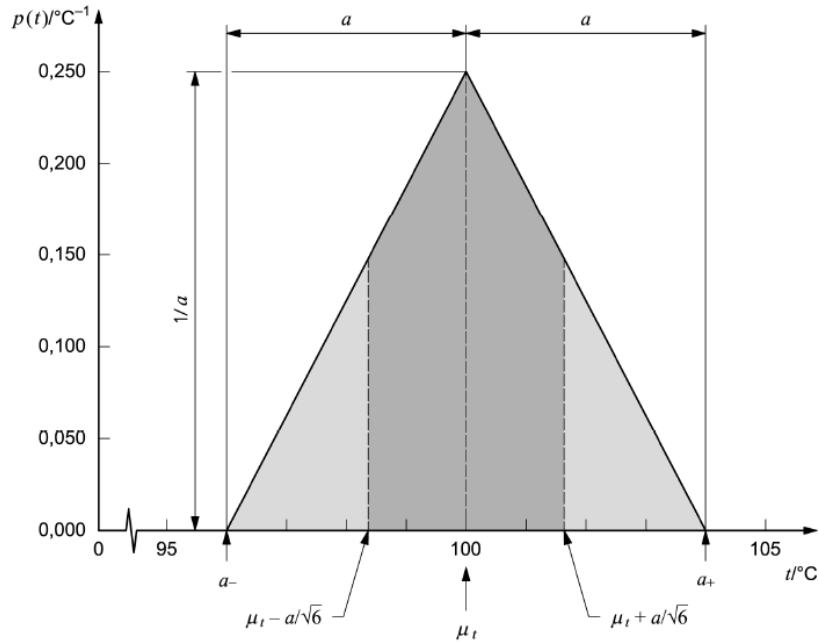


Figura 5.3 - Distribuição triangular [54]

5.3. Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída

Sempre que não se verifica a correlação entre as grandezas de entrada, a incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída é dada pela Equação 5.11 [54]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Equação 5.11}$$

A grandeza $u_i(y)$ é a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída y .

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad \text{Equação 5.12}$$

Onde c_i é o coeficiente de sensibilidade associado à incerteza-padrão da estimativa da grandeza de entrada x_i . O coeficiente de sensibilidade descreve como a estimativa de grandeza de saída y é influenciada por cada uma das estimativas de entrada x_i [54].

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 5.13}$$

Apesar de raro, quando as grandezas de entrada se correlacionam entre si deve ter-se em conta as covariâncias associadas e considerá-las como uma contribuição adicional para a incerteza. A lei de propagação de incerteza para este caso é expressa pela Equação 5.14 [54]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, c_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{2} c_{ij}^2 + c_{ij} \right) u^2(x_i) u^2(x_j) \quad \text{Equação 5.14}$$

5.4. Incerteza de Medição Expandida

A incerteza de medição expandida U é obtida multiplicando a incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída por um fator de expansão k [54].

$$U = k \times u(y) \quad \text{Equação 5.15}$$

Sempre que a distribuição normal possa ser aplicada à mensuranda e a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída possua suficiente fiabilidade, deve ser aplicado o fator de expansão ($k=2$). Neste caso, tem-se uma incerteza expandida com um intervalo de confiança de 95 %, porém é possível determinar o fator de expansão adequado através dos graus de liberdade efetivos. Para tal é necessário ter em consideração a fiabilidade da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída. O cálculo dos graus de liberdade efetivos é dado pela fórmula de *Welch-Satterthwaite*, Equação 5.16 [57]:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad \text{Equação 5.16}$$

O somatório de $u_i(y)$ é a contribuição para a incerteza-padrão da estimativa de saída y , decorrentes das incertezas-padrão das estimativas de entrada x_i , v_i é o número de graus de liberdade efetivos do componente da incerteza-padrão $u_i(y)$ [57].

Quando uma dada incerteza-padrão dos valores de entrada $u(\bar{q})$ é obtida por uma avaliação de tipo A, o número de graus de liberdade é expresso por $v_i = n - 1$. No caso da avaliação ser do tipo B é mais complexo estimar os graus de liberdade. No entanto, se por exemplo, forem definidos limites a_- e a_+ , estes são definidos de modo a que a probabilidade da grandeza em questão estar fora dos limites seja extremamente pequena, assim os graus de liberdade são assumidos como $v_i \rightarrow \infty$ [57].

O fator k é retirado da Tabela 5.1, sendo esta baseada numa distribuição *t-student* para uma probabilidade expandida de 95,45 %. Se v_{ef} , dado pela Equação 5.16, não for igual a um número inteiro, deve seleccionar-se o número inteiro antecedente da Tabela 5.1 [57].

Tabela 5.1 - Relação graus de liberdade efetivos e fator de expansão [57]

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2

Posto isto, o certificado de calibração estará completo quando apresentar a estimativa y da mensurada e a respetiva incerteza expandida associada U , e deve ser expresso na forma $Y = y \pm U$ [54].

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 5.17}$$

5.5. Determinação da Incerteza de Medição do Caudal no Padrão pelo Método Gravimétrico

5.5.1. Parâmetros que Influenciam a Medição

No desenvolvimento de um novo padrão é necessário determinar as fontes de incerteza que estão associadas à medição para que o valor desta seja o mais rigoroso possível. Para a determinação da incerteza é necessário identificar e considerar os vários parâmetros que influenciam o resultado da medição.

De modo a não tornar a dissertação extensa e exaustiva, determinou-se a incerteza de medição para o caso mais complexo: a medição de **caudal**, descurando a medição do **volume**, que apenas difere da anterior na inexistência do fator tempo.

5.5.1.1 Pesagem

No método gravimétrico, a pesagem é o parâmetro que mais influencia a medição. Os resultados de pesagem são influenciados por vários fatores, como a resolução e sensibilidade da balança, a calibração, a classe e a massa volúmica das massas usadas para a calibrar [58].

5.5.1.2 Massa Volúmica da Água

A massa é convertida em volume através do valor da massa volúmica do líquido de calibração (água). O valor da massa volúmica da água pode ser retirado da literatura [59] ou ser medido diretamente por instrumentos adequados [58].

5.5.1.3 Temperatura da Água

A temperatura da água influencia a sua massa volúmica; deste modo, a temperatura deve ser medida com rigor em cada ensaio [58].

5.5.1.4 Condições Ambientais

As condições ambientais influenciam principalmente a medição da massa volúmica do ar [58].

5.5.1.5 Características do Instrumento

Deve-se também considerar as características do instrumento a calibrar, nomeadamente a resolução e o coeficiente de expansão térmico do material [58].

5.5.1.6 Operador

O operador pode influenciar diretamente a medição no manuseamento do equipamento, pelo que é essencial ter um operador experiente.

5.5.1.7 Tempo

Sendo o caudal uma variação de volume ou massa num determinado intervalo de tempo, o tempo é, por consequência, um parâmetro que influencia a medição [58].

5.5.2. Modelo de Cálculo

A determinação da incerteza da medição do caudal volúmico no padrão está associada ao modelo de cálculo descrito pela Equação 5.18, retirada da norma ISO 4185 e adaptada ao padrão desenvolvido. Este modelo descreve a variação de volume num determinado intervalo de tempo (caudal) [16].

$$Q_V = \frac{1}{t_f - t_i} \left[\frac{(I_L - I_E)}{\rho_W} \times \left(\frac{1 - \frac{\rho_A}{\rho_B}}{1 - \frac{\rho_A}{\rho_W}} \right) + \Delta V \right] + \delta Q_{def} + \delta Q_{evap} + \delta Q_{rep}$$

Equação 5.18

$$\Delta V = \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) (1 - (\alpha_{\acute{a}gua} - 3\alpha_{tubo})\Delta T)$$

Equação 5.19

Nota: ρ_W (massa volúmica da água) e ρ_A (massa volúmica do ar) são obtidas através da fórmula de *Tanaka* e *Spieweck*, respetivamente – Anexo I.

As fontes de incerteza associadas ao modelo de cálculo são descritas na Tabela 5.2 e Tabela 5.3, bem como o tipo de avaliação correspondente e o tipo de distribuição.

Tabela 5.2 - Fontes de incerteza associadas ao modelo de cálculo (Parte 1)

FONTE DE INCERTEZA	INCERTEZA - PADRÃO	AVALIAÇÃO TIPO	DISTRIBUIÇÃO
Massa inicial	$u(I_E)$	-	-
Massa final	$u(I_L)$		
▪ Resolução da balança	R_{bal}	B	Retangular
▪ Incerteza da balança	$u(bal)$	B	Normal
Massa volúmica da água	$u(\rho_W)$	B	Retangular
Massa volúmica do ar	$u(\rho_A)$	B	Retangular
Massa volúmica das massas	$u(\rho_B)$	B	Retangular
Volume do tubo	$u(\Delta V)$	-	-
▪ Coeficiente de expansão térmica da água	$u(\alpha_{\acute{a}gua})$	B	Retangular
▪ Coeficiente de expansão térmica do material da tubagem	$u(\alpha_{tubo})$	B	Retangular

Tabela 5.3 - Fontes de incerteza associadas ao modelo de cálculo (Parte 2)

▪ Paquímetro	$u_{paquímetro}$	B	Normal
▪ Temperatura	$u(T)$	-	-
○ Incerteza do termómetro	$u(term)$	B	Normal
○ <i>Drift</i> do termómetro	δT	B	Retangular
Tempo inicial	$u(t_i)$	B	Normal
Tempo final	$u(t_f)$		
Resolução do caudalímetro/contador	$u(res)$	B	Normal
Tempo de comutação do defletor	$u(\delta Q_{def})$	B	Retangular
Evaporação	$u(\delta Q_{evap})$	B	Retangular
Repetibilidade	$u(\delta Q_{rep})$	A	Normal

5.5.3. Incertezas-Padrão [60]

5.5.3.1. Incerteza Associada à Massa Final

$$u(I_L) = \left[\left(\frac{u(bal)}{2} \right)^2 + \left(\frac{R_{bal}/2}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ [g]} \quad \text{Equação 5.20}$$

Em que $u(bal)$ corresponde à incerteza da balança e R_{bal} corresponde à resolução da mesma.

5.5.3.2. Incerteza Associada à Massa Inicial

$$u(I_E) = \left[\left(\frac{u(bal)}{2} \right)^2 + \left(\frac{R_{bal}/2}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ [g]} \quad \text{Equação 5.21}$$

Em que $u(bal)$ corresponde à incerteza da balança e R_{bal} corresponde à resolução da mesma.

5.5.3.3. Incerteza Associada à Massa Volúmica da Água

$$u(\rho_W) = \frac{(\rho_W(T+u_{term}) - \rho_W(T+u_{term}))/2}{\sqrt{3}} \text{ [g/mL]} \quad \text{Equação 5.22}$$

Em que u_{term} é a incerteza do termómetro referida no certificado de calibração [61].

5.5.3.4. Incerteza Associada à Massa Volúmica do Ar

$$u(\rho_A) = \frac{0,0000005}{\sqrt{3}} \text{ [g/mL]} \quad \text{Equação 5.23}$$

Nota: O valor que se apresenta só poderá ser utilizado caso o laboratório se encontre entre determinadas condições de temperatura, humidade e pressão [62] i.e. temperatura entre 18 °C a 30 °C, humidade inferior a 80% e pressão atmosférica entre 940 hPa a 1080 hPa [61].

5.5.3.5. Incerteza Associada à Massa Volúmica das Massas

$$u(\rho_B) = \frac{u(\rho_{mbal})}{\sqrt{3}} \text{ [g/mL]} \quad \text{Equação 5.24}$$

Em que $u(\rho_{mbal})$ é a incerteza da massa volúmica das massas de ajuste da balança indicadas no certificado de calibração das massas ou na OIML R111[62].

5.5.3.6. Incerteza Associada ao Volume do Tubo

O cálculo da incerteza-padrão associado ao volume do tubo é determinado com base na Equação 5.19.

Segue-se a determinação dos coeficientes de sensibilidade para o volume do tubo.

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial D_i} = \left(\pi \frac{D_i}{2} \times l \right) (1 - (\alpha_{\acute{a}gua} - 3\alpha_{tubo})\Delta T) \quad \text{Equação 5.25}$$

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial l} = \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \right) (1 - (\alpha_{\acute{a}gua} - 3\alpha_{tubo})\Delta T) \quad \text{Equação 5.26}$$

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial \alpha_{\acute{a}gua}} = - \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) \Delta T \quad \text{Equação 5.27}$$

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial \alpha_{tubo}} = (3) \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) \Delta T \quad \text{Equação 5.28}$$

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta T} = \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) (-\alpha_{\acute{a}gua} + 3\alpha_{tubo}) \quad \text{Equação 5.29}$$

Incerteza- padrão:

$$u(\Delta V) = \left(u^2(D_i) \times \left(\frac{\partial \Delta V}{\partial D_i} \right)^2 + u^2(l) \times \left(\frac{\partial \Delta V}{\partial l} \right)^2 + u^2(\alpha_{\acute{a}gua}) \times \left(\frac{\partial \Delta V}{\partial \alpha_{\acute{a}gua}} \right)^2 + u^2(\alpha_{tubo}) \times \left(\frac{\partial \Delta V}{\partial \alpha_{tubo}} \right)^2 + u^2(\Delta T) \times \left(\frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 5.30}$$

Sabendo que:

5.5.3.6.1. Incerteza Associada ao Paquímetro

$$u(D_i) = \frac{U_{paquímetro}}{2} \text{ [mm]} \quad \text{Equação 5.31}$$

$$u(l) = \frac{U_{paquímetro}}{2} \text{ [mm]} \quad \text{Equação 5.32}$$

Em que $u(paquímetro)$ é a incerteza do paquímetro referida no certificado de calibração.

5.5.3.6.2. Incerteza Associada ao Coeficiente de Expansão Térmica da Água

$$u(\alpha_{\acute{a}gua}) = \frac{5\% \times \alpha_{\acute{a}gua}}{\sqrt{3}} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}] \quad \text{Equação 5.33}$$

Em que $\alpha_{\acute{a}gua}$ é o coeficiente de expansão térmica da água.

5.5.3.6.3. Incerteza Associada ao Coeficiente de Expansão Térmica do Material da Tubagem

$$u(\alpha_{tubo}) = \frac{5\% \times \alpha_{tubo}}{\sqrt{3}} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}] \quad \text{Equação 5.34}$$

Em que α_{tubo} é o coeficiente de expansão térmica do material da tubagem, aço inox AISI 304 [61].

5.5.3.6.4. Incerteza Associada à Temperatura

$$u(T) = \left[\left(\frac{u_{term}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{1/2} [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Equação 5.35}$$

Em que u_{term} é a incerteza do termómetro referida no certificado de calibração [61] e δT corresponde ao *drift* do termómetro.

Pode agora substituir-se na Equação 5.30 as equações das incertezas referentes ao diâmetro interno do tubo, ao comprimento do tubo, à temperatura e ao coeficiente de expansão térmica da água e do material da tubagem, ficando:

$$u(\Delta V) = \left(\left(\frac{U_{paquímetro}}{2} \right)^2 \times \left(\left(\pi \frac{D_i}{2} \times l \right) (1 - (\alpha_{\text{água}} - 3\alpha_{\text{tubo}})\Delta T) \right)^2 + \left(\frac{U_{paquímetro}}{2} \right)^2 \times \left(\left(\pi \frac{D_i^2}{4} \right) (1 - (\alpha_{\text{água}} - 3\alpha_{\text{tubo}})\Delta T) \right)^2 + \left(\frac{5\% \times \alpha_{\text{água}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \times \left(- \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) \Delta T \right)^2 + \left(\frac{5\% \times \alpha_{\text{tubo}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \times \left((3) \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) \Delta T \right)^2 + \left(\left[\left(\frac{u_{term}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{1/2} \right)^2 \times \left(\left(\pi \frac{D_i^2}{4} \times l \right) (-\alpha_{\text{água}} + 3\alpha_{\text{tubo}}) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Equação 5.36

5.5.3.7. Incerteza Associada ao Tempo inicial e final

$$u(t_i) = u(t_f) = \frac{u(\text{cronómetro})}{2} [\text{s}] \quad \text{Equação 5.37}$$

Em que $u(\text{cronómetro})$ é a incerteza do cronómetro referida no certificado de calibração.

5.5.3.8. Incerteza Associada à Resolução do Caudalímetro

$$u(res) = \frac{res/2}{\sqrt{3}} [\text{mL/s}] \quad \text{Equação 5.38}$$

Em que res é a resolução do instrumento a calibrar.

5.5.3.9. Incerteza Associada ao Tempo de Comutação do Defletor

$$u(\delta Q_{def}) = \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} [\text{mL/s}] \quad \text{Equação 5.39}$$

Em que Δt é a variação de tempo determinada experimentalmente que dependerá do caudal de ensaio.

5.5.3.10. Incerteza Associada à Evaporação

$$u(\delta Q_{evap}) = \frac{\delta Q_{evap}}{\sqrt{3}} \text{ [mL/s]} \quad \text{Equação 5.40}$$

Onde δQ_{evap} é a variação da evaporação. Valor determinado experimentalmente.

5.5.3.11. Incerteza Associada à Repetibilidade

$$u(\delta Q_{rep}) = \frac{s(V_0)}{\sqrt{n}} \text{ [mL/s]} \quad \text{Equação 5.41}$$

Em que $s(V_0)$ é o desvio padrão da média de uma série de resultados e n é o número de ensaios realizados.

5.5.4. Coeficientes de Sensibilidade

São agora determinados os coeficientes de sensibilidade para cada um dos parâmetros associados ao modelo de cálculo do caudal. A Equação 5.42 apresentada abaixo é uma simplificação da Equação 5.18 de modo a facilitar a compreensão dos cálculos.

$$Q_v = \frac{1}{t_f - t_i} [m \times A \times B + \Delta V] + \delta Q_{def} + \delta Q_{evap} + \delta Q_{rep} \quad \text{Equação 5.42}$$

$$\text{Sabendo que: } \begin{cases} m = (I_L - I_E) \\ A = \frac{1}{\rho_W} \\ B = \left(\frac{1 - \frac{\rho_A}{\rho_W}}{\frac{\rho_B}{\rho_A} - 1} \right) \end{cases}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial I_E} = -\frac{1}{t_f - t_i} [A \times B] \quad \text{Equação 5.43}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial I_L} = \frac{1}{t_f - t_i} [A \times B] \quad \text{Equação 5.44}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_W} = -\frac{1}{t_f - t_i} \left[m \times \frac{\rho_A - \rho_B}{\rho_B (\rho_A - \rho_W)^2} \right] \quad \text{Equação 5.45}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_A} = \frac{1}{t_f - t_i} \left[m \times A \times \frac{\rho_W (\rho_B - \rho_W)}{\rho_B (\rho_A - \rho_W)^2} \right] \quad \text{Equação 5.46}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_B} = -\frac{1}{t_f - t_i} \left[m \times A \times \frac{\rho_A \times \rho_W}{\rho_B^2 (\rho_A - \rho_W)} \right] \quad \text{Equação 5.47}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t_i} = \frac{1}{(t_f - t_i)^2} [m \times A \times B + \Delta V] \quad \text{Equação 5.48}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t_f} = -\frac{1}{(t_f - t_i)^2} [m \times A \times B + \Delta V] \quad \text{Equação 5.49}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \Delta V} = \frac{1}{(t_f - t_i)} \quad \text{Equação 5.50}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \delta Q_{def}} = 1 \quad \text{Equação 5.51}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \delta Q_{evap}} = 1 \quad \text{Equação 5.52}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \delta Q_{rep}} = 1 \quad \text{Equação 5.53}$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial res} = 1 \quad \text{Equação 5.54}$$

5.5.5. Incerteza Combinada

Posteriormente à identificação das incertezas e da determinação dos coeficientes de sensibilidade, segue-se o cálculo da incerteza combinada.

$$u(Q_v) = \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\partial Q_v}{\partial I_E} \right)^2 u^2(I_E) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial I_L} \right)^2 u^2(I_L) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_W} \right)^2 u^2(\rho_W) \\ & + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_A} \right)^2 u^2(\rho_A) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_B} \right)^2 u^2(\rho_B) \\ & + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial t_i} \right)^2 u^2(t_i) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial t_f} \right)^2 u^2(t_f) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \Delta V} \right)^2 u^2(\Delta V) \\ & + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \delta Q_{def}} \right)^2 u^2(\delta Q_{def}) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \delta Q_{evap}} \right)^2 u^2(\delta Q_{evap}) + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial \delta Q_{rep}} \right)^2 u^2(\delta Q_{rep}) \\ & + \left(\frac{\partial Q_v}{\partial res} \right)^2 u^2(res) \end{aligned} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Equação 5.55

5.5.6. Incerteza Expandida

A incerteza expandida é obtida multiplicando a incerteza combinada pelo fator de expansão k .

$$U(Q_v) = u(Q_v) \times k$$

Equação 5.56

O fator de expansão, k , pode ser determinado como ilustrado no subcapítulo 5.4

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1. Calibração de Contadores/Caudalímetros pelo Método *Flying-Start-and-Finish* Estático [12]

Neste subcapítulo são mencionados os equipamentos, as condições ambientais e o modo operatório da calibração de contadores e caudalímetros pelo método gravimétrico. O procedimento experimental é realizado pelo método “*flying-start-and-finish*” estático.

De forma a melhor compreender como se desenrola o procedimento experimental, a Figura 6.1 ilustra os passos principais do procedimento, utilizando um exemplo simples.

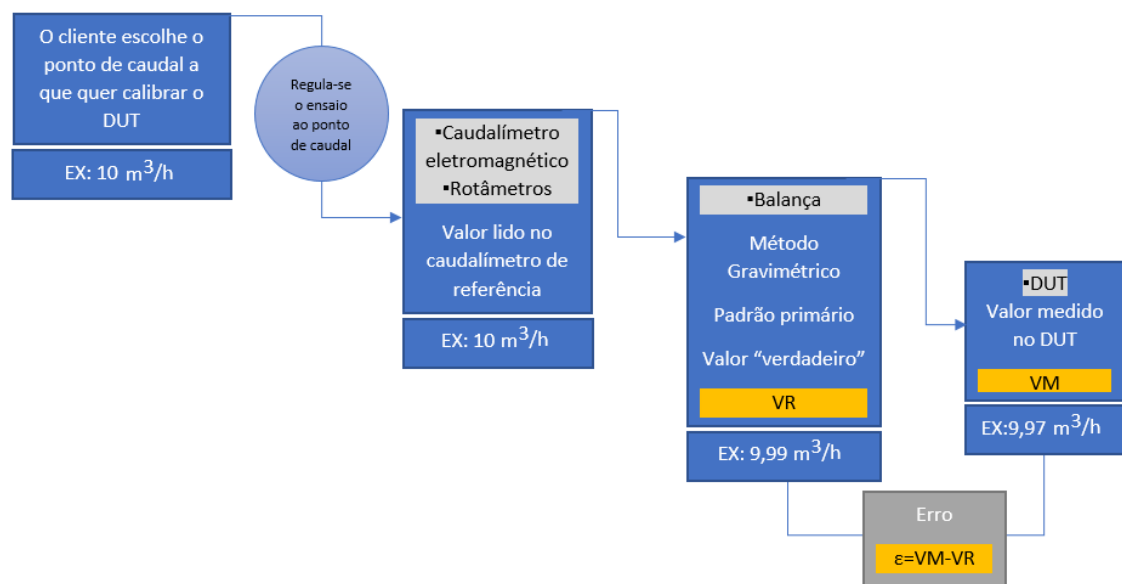


Figura 6.1 - Esquema de procedimento experimental

6.1.1. Material

Os equipamentos e materiais utilizados são os mencionados e analisados no Capítulo 4.

- **Balança**
- **Barómetro**
- **Higrómetro**
- **Cronómetro**
- **Termómetro**

- Líquido de calibração
- Bomba centrífuga
- Caudalímetro eletromagnético
- Rotâmetros
- Filtro de partículas
- Reservatório de abastecimento
- Reservatório de pesagem
- Válvulas de agulha
- Válvula de diafragma
- Válvula de globo
- Válvulas de esfera de 3 vias-T
- Válvulas de retenção
- Válvula de segurança
- Visor

6.1.2. Condições de Referência

6.1.2.1. Condições Ambientais

O procedimento experimental compreende as seguintes condições ambientais:

Intervalo da temperatura ambiente:	15 °C a 25 °C
Intervalo da humidade relativa ambiente:	45 % a 75 %
Intervalo da pressão atmosférica ambiente:	86 kPa a 106 kPa (0,86 bar a 1,06 bar)

A temperatura da água deve estar à temperatura ambiente e a sua variação durante o ensaio não deve ser superior a 2 °C.

6.1.2.2. Estabilização da Temperatura

A estabilização da temperatura é um fator importante para um bom resultado na medição, pelo que é essencial que todos os equipamentos, bem como o líquido de calibração e o DUT estejam à mesma temperatura.

Para assegurar que isso acontece, devem ser colocados previamente no laboratório, 12 horas antes do ensaio, de forma a garantir este equilíbrio térmico. A temperatura ambiente do laboratório deve ser controlada $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$.

6.1.3. Modo Operatório

6.1.3.1. Limpeza

A balança, a tubagem e todos os outros equipamentos deverão encontrar-se limpos para obter resultados mais corretos e fiáveis possíveis. Na tubagem e nos seus componentes deve proceder-se à limpeza com sopro de ar comprimido.

A prévia limpeza do reservatório de abastecimento e do reservatório de pesagem é fundamental para o correto funcionamento do sistema, bem como para os bons resultados de medição. Estes recipientes devem ser enxaguados antes da sua utilização e deve confirmar-se que não existem depósitos de partículas sólidas. Uma limpeza deficiente dos reservatórios pode introduzir erros de medição na pesagem do líquido durante o ensaio ou até mesmo danificar as pás do rotor da bomba se alguma partícula sólida entrar no tubo de aspiração.

6.1.3.2. Sistema em Carga

Por sistema em carga entende-se o total preenchimento da tubagem com água, i.e., o sistema está em carga quando são retiradas todas as bolsas e bolhas de ar existentes no interior deste. A purga de ar deve ser feita através do bombeamento durante um período de tempo. Quando o sistema estiver sem bolhas de ar, pleno de água, deve esperar-se um determinado tempo (a definir experimentalmente) em caudal de ensaio até estabilizar e após esse tempo iniciar a medição.

6.1.3.3. Medição da Temperatura

A medição da temperatura da água é realizada antes e após o ensaio experimental. A primeira é medida no reservatório de abastecimento e a última no reservatório de recolha. Para efeito de cálculos é considerada a média das duas medições.

6.1.3.4. Sistema de Aquisição e Recolha de Dados

A medição da temperatura do fluido deve ser feita manualmente no início e no fim de cada ensaio, medida no reservatório de abastecimento e de pesagem, respetivamente. O registo do tempo deve ser iniciado no instante da comutação do escoamento para o reservatório de pesagem e terminado no instante da comutação para o reservatório de abastecimento. A medição da massa deve ser registada antes e depois da recolha de líquido no reservatório de pesagem.

6.1.4. Procedimento Experimental da Calibração de Contadores/Caudalímetros pelo Método Flying-Start-and-Finish Estático

A realização da calibração deve ser executada segundo estas etapas:

1. Realizar a montagem dos tubos (troços retos) correspondentes ao diâmetro nominal do contador/caudalímetro a calibrar (DUT);
2. Instalar os sensores de pressão a montante e a jusante do aparelho a calibrar;
3. Instalar o DUT na tubagem;
4. Fazer o enchimento do reservatório de abastecimento com água;
5. Escolher a linha I, II ou III a utilizar de acordo com o caudal a medir e direccionar o escoamento através das válvulas de esfera;
6. Garantir que as válvulas reguladoras de caudal se encontram abertas (Nota: durante a regulação de caudal é importante garantir que as duas válvulas não se encontrem fechadas em simultâneo sobre pena de ser accionada a válvula de segurança);
7. Iniciar a bomba para fazer a purga do ar contido no interior do sistema. A purga deve ser realizada com um caudal igual ao do ensaio que lhe sucede, ou superior caso o valor de caudal seja baixo, permitindo reduzir o tempo de preparação do ensaio. A purga deve decorrer até não existirem bolhas de ar no sistema, pelo que se deve certificar que não há saída de bolhas de ar pelo tubo mergulhado no reservatório;
8. Verificar as condições de temperatura, humidade relativa e pressão e registar nos respetivos campos da folha de cálculo realizada para o efeito.
9. Medir a temperatura do líquido no reservatório de abastecimento e registar na folha de cálculo;
10. Medir a massa inicial do reservatório de pesagem e de qualquer líquido residual que esteja no mesmo e registar na folha de cálculo ou simplesmente tarar a balança;

11. Depois de garantir que toda a tubagem está em carga, iniciar o processo de regulação do caudal através do ajuste das válvulas de regulação de caudal e da leitura de referência, e posterior estabilização durante 10 min;
12. Quando as condições de escoamento estiverem estabilizadas, carregar no botão de comutação do escoamento para dentro do reservatório de pesagem. Em simultâneo, registar o valor indicado no DUT e iniciar a contagem do tempo (se o DUT for um caudalímetro). O escoamento deve estar canalizado para o reservatório de pesagem até se considerar que este tem a quantidade suficiente de líquido para se alcançar a precisão desejada (objeto de estudo);
13. Quando a quantidade existente no reservatório de pesagem for suficiente, comutar o escoamento para o reservatório de abastecimento. A medição do tempo deve ser parada e registada na folha de cálculo, tal como o valor indicado no DUT;
14. Medir a temperatura final do líquido no reservatório de pesagem e registar;
15. Medir a massa final do reservatório de pesagem com o líquido coletado e registar;

Este método apenas permite determinar o caudal médio total pela diferença entre a quantidade mássica final e inicial sobre o tempo total, ao contrário do método dinâmico que faz uma leitura incremental da quantidade mássica coletada no reservatório durante um determinado intervalo de tempo.

7. CONCLUSÃO

Através da utilização de filosofias da Teoria Axiomática de Projeto, de referências normativas e aplicação de metodologias de rigor metrológico foi possível conceber o projeto de um Banco de Ensaio para caudalímetros e contadores de água pelo método gravimétrico, cuja capacidade de trabalho se encontra entre um intervalo de caudal até $28 \text{ m}^3/\text{h}$, aproximadamente. A aplicação do método “*Flying-start-and-finish*” estático é também uma das particularidades do projeto.

Concluiu-se a conceção do projeto onde se especificaram os componentes essenciais para o funcionamento, apresentou-se os cálculos e os dimensionamentos necessários, fez-se a modelação 3D em *SolidWorks* e os desenhos técnicos para fabrico. Porém, o projeto tornou-se mais complexo e mais caro do que inicialmente se pensou, pelo que não foi possível implementá-lo e, consequentemente, testá-lo e validá-lo.

A nível técnico foi possível concluir que a geração de caudal por bombagem é uma solução adequada e financeiramente viável. O sistema de *bypass* para regulação do caudal e pressão requer algum trabalho por parte do operador mas consegue-se alcançar o pretendido. A canalização apresenta uma estrutura robusta e fixa devido à aplicação de aço inox AISI 304, adequado para aplicações com água.

A maior dificuldade sentida na realização do projeto residiu no processo iterativo que existiu entre a construção do *layout*, as escolhas dos acessórios, os cálculos e a modelação. Qualquer alteração num campo implicou um ajuste nos restantes: p.e, a simples mudança de espessura da tubagem implica alterações na escolha comercial dos tubos, nos cálculos de geração de caudal e na modelação 3D. Outra dificuldade consistiu na consulta ao mercado devido à demora do *feedback* e orçamentação por parte dos vendedores.

No que diz respeito aos Materiais e Métodos:

A Teoria do Projeto Axiomático permitiu fazer um mapeamento lógico e detalhado de qualquer ponto do sistema durante a fase de conceção. Permitiu compreender com clareza os requisitos que seriam fundamentais para o funcionamento do sistema (domínio funcional) e encontrar, no domínio físico, soluções que os satisfizessem. O teorema da independência foi respeitado sempre que possível, uma vez que grande parte dos FR's foram satisfeitos sem afetar outro FR, excetuando o caso do controlo do caudal e da pressão em que não foi possível encontrar soluções independentes. É de notar que no início do projeto não foram utilizadas

quaisquer teorias de projeto, mas facilmente se percebeu que a teoria axiomática se encaixava na perfeição e traria inúmeros benefícios ao desenvolvimento deste.

O rigor e a boa prática exigidos neste projeto levaram à aplicação de métodos de funcionamento e medição apropriados. A aplicação do Método Gravimétrico foi estabelecida previamente de acordo com o tema da dissertação, por ser um método com elevada exatidão, pequena incerteza associada e credível do ponto de vista científico. O método “*Flying-start-and-finish*” associado ao método estático foi definido em conformidade com as referências normativas e permite o bom funcionamento do sistema.

As referências normativas, o estado de arte e os procedimentos experimentais realizados na formação desempenharam um papel fundamental no conhecimento relacionado com a calibração dos aparelhos em causa. As normas foram importantes pelas suas referências idóneas e pela conformidade com futuros processos legislativos, de acreditação e certificação. O estado de arte impulsionou o processo criativo de conceção do sistema, proporcionando novas ideias através de diferentes exemplos. Os procedimentos experimentais realizados durante a formação permitiram uma familiarização com equipamentos de medição e com vários métodos de medição de volume e caudal.

Na sequência do desenvolvimento do projeto foram identificados os diversos parâmetros que influenciam o resultado da medição e determinada a incerteza da mesma. O modelo de cálculo utilizado foi adaptado da norma ISO 4185 [16] e as fontes de incerteza associadas a ele foram descritas, bem como o tipo de avaliação e distribuição. Efetivamente, não foi possível concluir nada em relação à melhoria da exatidão das medições uma vez que o sistema não foi implementado e não existiram ensaios. Ainda assim, ficou descrita esta ferramenta, que poderá ser útil para um futuro próximo.

Descreveu-se também um procedimento experimental de interesse para o trabalho em questão, onde se mencionam os equipamentos, as condições ambientais e o modo operativo. Este procedimento descreve e uniformiza o modo de atuar durante a realização de um ensaio, facultando os meios para a boa prática dos ensaios experimentais.

A presente dissertação é uma contribuição para o desenvolvimento da aplicação do método gravimétrico em calibrações de contadores e caudalímetros. Desta forma, foi da nossa responsabilidade divulgar este projeto no VIII Encontro de Investigadores da Qualidade 2017, realizado em Coimbra e colaborar desta forma, para um avanço do sistema de distribuição de água em Portugal.

Trabalhos Futuros

Num futuro próximo deve proceder-se à construção e implementação do Banco de Ensaio no LVC. Uma vez implementado, devem ser realizados testes de ensaio e análise de resultados que permitirão aferir respostas sobre a exatidão das medições.

Os resultados obtidos e as respetivas incertezas serão validados através da realização de uma comparação internacional. Este trabalho resulta num aumento da capacidade de medição do LVC pois permitirá calibrar e certificar contadores e caudalímetros baseado no método gravimétrico.

Oportunidades de Melhoria

Existem algumas melhorias que podem e devem ser desenvolvidas, principalmente na área da automação. Deve ser desenvolvido um sistema *cyber*-físico personalizado, onde seja possível operar os componentes mecânicos de uma forma inteligente e autónoma, bem como adquirir e armazenar os dados de calibração. A pressão e o caudal devem ser regulados pelas válvulas que recebem o *feedback* dos leitores introduzidos na linha e atuar automaticamente de forma a satisfazer o comando introduzido. Do mesmo modo, a válvula de comutação deve ser executada por um comando e simultaneamente fazer a aquisição dos dados do tempo e massa. Devem ser introduzidos sensores de temperatura ao longo da linha para uma adequada monitorização da temperatura da água.

Outra melhoria que pode ser implementa é a substituição dos reservatórios IVC existentes por uns de aço inox, dando mais estabilidade à instalação e a possibilidade de colocação de sensores de temperatura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] International Organization For Standardization, ISO 4064-1 – Water meters for cold potable water and hot water, 4ª ed., 2014.
- [2] IPQ , “IPQ - Instituto Português da Qualidade,” [Online]. Disponível em: www.ipq.pt [Acedido a 03 de Fevereiro de 2017].
- [3] “Decreto-Lei nº 71/2012,” *Diário da República*, 1.ª série - Nº 58, 21 de Março de 2012.
- [4] E. Batista, Procedimento técnico “Calibração de material volumétrico,” LNM – Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [5] A. Bandeira, Otimização de um Padrão Gravimétrico de Medição de Caudal de Fluidos entre 20 mL/h a 0,006 mL/h e Extensão da Capacidade para 600 mL/h, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013.
- [6] H. Preben e R. Fiona, Metrology - In Short, Terceira edição ed., EURAMET, 2008.
- [7] C. Sousa, Metrologia – Notas Históricas, Catim, 2010.
- [8] Inmetro, “Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia”. [Online]. Disponível em: www.inmetro.rs.gov.br/cicmac/material_didatico/polig_conceito_metrologia.pdf, [Acedido a 02 de Fevereiro de 2017].
- [9] *Portaria nº888/2010*, 1ª série 178, 13 de Setembro de 2010.
- [10] IPQ - Instituto Português da Qualidade, Vocabulário Internacional de Metrologia, 1ª edição Luso - Brasileira ed., Caparica, 2012.
- [11] E. Batista, E. Filipe e M. Azevedo, “Metodologias de Validação na Calibração de Instrumentos Volumétricos,” SPMET, 2004.
- [12] Instituto Português da Qualidade, NP EN ISO 4787 – Vidraria de laboratório. Instrumentos volumétricos. Métodos para ensaio da capacidade e para utilização, 2ª ed., Caparica, 2011.
- [13] International Organization For Standardization, ISO 4064-3 Measurement of water flow in closed conduits – Meters for cold potable water, 2ª ed., Maio 1999.

- [14] Instituto Português da Qualidade, NP EN 24006 Medição do caudal de fluidos em condutas fechadas; Vocabulário e Símbolos, 2002.
- [15] M. Toledo, “Pesagem Dinâmica.” [Online]. Disponível em: https://www.mt.com/int/pt/home/applications/Laboratory_weighing/Dynamic_weighing.html?cmp=sea_09010922&SE=Google&Campaign=MT_LAB_POR_POR&Adgroup=DynamicWeighing&bookedkeyword=%2Bpesagem%2Bdinamica&matchtype=b&adtext=214104009072&placement=&network=g&kl. [Acedido a 10 de Outubro de 2017].
- [16] International Organization For Standardization, ISO 4185 – Measurement of liquid flow in closed conduits – weighing method, 1ª ed., 1980.
- [17] V. Hubka e W.E. Eder, “Design Science,” Springer-Verlag London Limited, 1996. ISBN 3-540-19997-7.
- [18] K. Popper, “A Lógica da Pesquisa Científica,” Editora Pensamento Cultrix, 17th Ed., (in Portuguese, 1st ed. 1959, original title: The Logic of Scientific Discovery). ISBN 85-316-0236-x.
- [19] A. Coelho, “Design Theory and Methodology,” *Apresentação PowerPoint* - UNIDEMI, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [20] A.Coelho, A. Mourão e J.Pamies, “Axiomatic design as a background for concurrent engineering education and practice,” CE: The Vision for the Future Generation in Research and Applications, J. Cha et al. (eds) © 2003 Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 622 X.
- [21] N. P. Suh, “The Principles of Design,” New York: Oxford University Press, 1990.
- [22] N. P. Suh, “Axiomatic Design: Advances and Applications,” New York: Oxford University Press, 2001.
- [23] A. M. Gonçalves-Coelho, G. Neştian, M. Cavique, and A. Mourão, “Tackling with Redundant Design Solutions Through Axiomatic Design,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **13**, 10, pp.1837-1843 (2012).

[24] IPQ - Instituto Português da Qualidade, “Normalização.” [Online]. Disponível em: <http://www1.ipq.pt/PT/Normalizacao/Pages/Normalizacao.aspx>. [Acedido a 29 de Setembro de 2017].

[25] International Organization For Standardization, ISO 4064-2 Measurement of water flow in closed conduits – Meters for cold potable water, 2^a ed., Junho 2001.

[26] Instituto Português da Qualidade, NP 2938 Contadores de água limpa, para uso doméstico, comercial ou da indústria ligeira; Verificações metrológicas, 2^a ed., Janeiro 2008.

[27] Instituto Português da Qualidade, NP 4360 Contadores de água potável fria; Caudalímetros eletromagnéticos. Terminologia, definições, características tecnológicas e características metrológicas, Maio 1999.

[28] J. Pope, A. Johnson, J. Filla, J. Boyd, C.Crowley, V. Bean, “NIST’s Fully Dynamic Gravimetric Liquid Flowmeter Standard,” Virginia, April 2015.

[29] J. Geršl e L. Lojek, “EURAMET project No. 1046 Inter-comparison of water flow standards using electromagnetic flowmeters,” Julho 2011. [Online]. Disponível em: https://www.euramet.org/Media/docs/projects/EURAMET-P1046_FLOW_Report_draftB.pdf. [Acedido a 24 de Setembro de 2017].

[30] HUBEL, “Contadores volumétricos.” [Online]. Disponível em: <http://www.hubel.pt/pt/hia/products/contadores-de-agua/product/volumetricos/>. [Acedido a 25 de abril de 2018].

[31] “Tipos de contadores de água.” [Online]. Disponível em: <https://alertlabs.zendesk.com/hc/en-us/articles/115001268973-Types-of-water-meters#velocity>. [Acedido a 30 de Abril de 2018].

[32] RESOPRE, “Contadores.” [Online]. Disponível em: http://resopre.pt/conteudo.php?pag=AGUA_RESOPRE.PT&fam=CONTADORES. [Acedido a 30 de Abril de 2018].

[33] A. Coelho, “O PROJECTO DE ENGENHARIA UMA PERSPECTIVA AXIOMÁTICA,” Monte Caparica, 1994.

[34] BIPM- Bureau International des Poids et Mesures, “Calibration and Measurement Capabilities Mass and related quantities.” [Online]. Disponível em:

http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list.asp?page=1&page_sav=2&iservice=M/FF.9.3.1.
[Acedido a 21 de Setembro de 2017].

[35] Genebre, “Produtos.” [Online]. Disponível em: <https://www.genebre.com/industrial-line>.
[Acedido a 24 de Agosto de 2017].

[36] ebah, “Válvulas.” [Online]. Disponível em:
<http://www.ebah.pt/content/ABAAABgZsAK/valvulas>. [Acedido a 17-09-2017].

[37] Gemu, “Full Bore Diaphragm Valve, Metal.” [Online]. Disponível em: https://www.gemu-group.com/gemu-cdn/dokumente/2/db_655_gb.pdf. [Acedido a 15 de Junho de 2017].

[38] “Válvula de diafragma.” [Online]. Disponível em:
https://www.google.pt/search?q=válvula+de+diafragma&rlz=1C1AVUA_enPT767PT767&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=5cn99IUoedHlxM%253A%252CvntPXCQ0HM_I3M%252C_&usg=__cBMzVXDift3wFnTENSA2IlaXEDg%3D&sa=X&ved=0ahUKEwj6xtqH5-nYAhUD6xQKHSrRBDIQ9QEINzAE#imgsrc=5cn99IUoe. [Acedido a 21 de Setembro de 2017].

[39] Detron, “Válvulas de agulha.” [Online]. Disponível em:
<http://www.detron.com.br/valvulas-agulha>. [Acedido a 17 de Setembro de 2017].

[40] Genebre, “Catálogo Industrial.” [Online]. Disponível em:
https://www.genebre.es/media/contents/catalogo/genebre_catalogo_industrial_2016.pdf.
[Acedido a 13 de Maio de 2017].

[41] “válvula de agulha funcionamento.” [Online]. Disponível em:
https://www.google.pt/search?q=valvula+de+agulha&rlz=1C1AVUA_enPT767PT767&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjC-JamjI3aAhUJWxQKHVcvBUgQ_AUICigB&biw=911&bih=425#imgsrc=RDfpTlEnP4jC1M.
[Acedido a 15 de Outubro de 2017].

[42] ISOMAG, “Caudalímetro eletromagnético.” [Online]. Disponível em:
http://www.contimetra.com/Conteudos_F/IA/capitulos/00_isoil_isomag_caudalimetros_electromagneticos/iice_isomag_12.pdf. [Acedido a 14 de Agosto de 2017].

[43] L.Ferreira, “Caudalímetro Eletromagnético.” [Online]. Disponível em:
https://www.eq.uc.pt/~lferreira/BIBL_SEM/global/electrom/pdf/electr.pdf. [Acedido a 18 de Setembro de 2017].

[44] Gemu, “Flowmeter.” [Online]. Disponível em: <http://catalog.gemu-group.com/Asset/Flow-Measurement-db-800.pdf>. [Acedido a 05 de Julho de 2017].

[45] L.Ferreira, “Rotâmetro.” [Online]. Disponível em: https://www.eq.uc.pt/~lferreira/BIBL_SEM/global/rotametro/pdf/rotametro.pdf. [Acedido a 18 de Setembro de 2017].

[46] Tubinox, “Secção Industrial.” [Online]. Disponível em: <http://www.tubinox.pt/seccoes/1>. [Acedido a 17 de Agosto de 2017].

[47] “Funcionamento de válvula de 3 vias T.” [Online]. Disponível em: https://www.google.pt/search?q=funcionamento+de+v%C3%A1lvula+de+3+vias+T&rlz=1C1AVUA_enPT767PT767&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjHgsDimOzYAhVFxRQKHc8B3AQ_AUICigB&biw=1366&bih=637#imgdii=cSMDvQ4u2vKnQM:&imgsrc=3au6QvcPKiu76M: [Acedido a 22 de Janeiro de 2018].

[48] S. B. Araújo, APONTAMENTOS DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS, 1997.

[49] C. Oliveira, “Tipo de Roscas.” [Online]. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/diferen%C3%A7as-entre-roscas-bsp-e-npt-cleyton-oliveira>. [Acedido a 02 de Novembro de 2017].

[50] apta, “Associação de Produtores de Tubos em Aço soldados longitudinalmente e Acessórios em Ferro Fundido maleável roscados para canalizações.” [Online]. Disponível em: <http://www.apta.pt/>. [Acedido a 02 de Novembro de 2017].

[51] SPXFLOW, “Curva da bomba centrífuga Waukesha Cherry-Burrel.” [Online]. Disponível em: http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/95-07098_C216_2900_50Hz.pdf. [Acedido a 22 de Janeiro de 2018].

[52] Wikipédia, “Princípio de Bernoulli.” [Online]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio_de_Bernoulli. [Acedido a 03 de Novembro de 2017].

[53] Instituto Português da Qualidade, NP EN 14154-3 Contadores de água Parte 3: Métodos e equipamentos de ensaio, 2008.

[54] JCGM 2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1ª ed., 2008.

[55] J. C. Silva, Manual de elaboração de relatórios e tratamento de resultados experimentais, Janeiro 1992.

[56] P. Guedes, Metrologia Industrial, 1^a edição, Lisboa, Outubro 2011.

[57] IPQ - Instituto Português da Qualidade, Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração, 2^a ed., Caparica, Novembro 2005.

[58] EURAMET, Calibration Guide - Guidelines on the determination of uncertainty in gravimetric volume calibration, 2012.

[59] E. Batista e R. Panton, The selection of water property formulae for volume and flow calibration, 2017.

[60] E. Batista, Procedimento técnico “Calibração de caudalímetros de líquidos pelo método gravimétrico,” LNM – Instituto Português da Qualidade, 2015.

[61] E. Batista, Procedimento técnico “Cálculo de incertezas no método gravimétrico,” LNM – Instituto Português da Qualidade , 2011.

[62] H. Bettin e F. Spieweck, “Review: Solid Liquid density determination,” Tm - TechnischesMessen, vol. 59, p. 249, 1992.

[63] Valcontrol, “Válvula de segurança.” [Online]. Disponível em: http://www.valcontrol.pt/resources/93_7_095.en.pdf. [Acedido a 12 de Março de 2018].

[64] SPXFLOW, “Manual da bomba centrífuga Waukesha Cherry-Burrell.” [Online]. Disponível em: http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/95-03008-NEMA_centpc_wcb.pdf. [Acedido a 17 de Agosto de 2017].

[65] ISOMAG, “Data sheet.” [Online]. Disponível em: http://archivio.isoil.eu/MS2500_EN.pdf. [Acedido a 24 de Agosto de 2017].

[66] Nocado, “União DIN.” [Online]. Disponível em: http://www.nocado.com.br/expand/acesso/sn_uni.pdf. [Acedido a 05 de Setembro de 2017].

ANEXOS

Anexo I – Massa Volúmica da Água e do Ar

A fórmula que permite calcular a massa volúmica da água:

Fórmula de Tanaka [62]

$$\rho_W = a_5 \left[1 - \frac{(T+a_1)^2(T+a_2)}{a_3(T+a_4)} \right] \text{ kg/m}^3 \quad \text{Equação I.1}$$

Onde:

T – Temperatura, °C;

$$a_1 = -3,983035$$

$$a_2 = 301,797$$

$$a_3 = 522528,9$$

$$a_4 = 69,34881$$

$$a_5 = 999,974950$$

A fórmula que permite calcular a massa volúmica do ar:

Fórmula de Spieweck [62]

$$\rho_A = \frac{k_1 p_A + h_r (k_2 T_A + k_3)}{T_A + 273,15} \text{ g/mL} \quad \text{Equação I.2}$$

Onde:

T_A – Temperatura ambiente, °C;

p_A – Pressão, hPa;

h_r – Humidade relativa, %;

$$k_1 = 3,4844 \times 10^{-4} \text{ , } ^\circ\text{C/hPa};$$

$$k_2 = 2,52 \times 10^{-6} \text{ , g/mL};$$

$$k_3 = 2,0582 \times 10^{-5}, ^\circ\text{C}$$

Anexo II – Ferramentas de Cálculo de Dinâmica de Fluidos e Soldadura

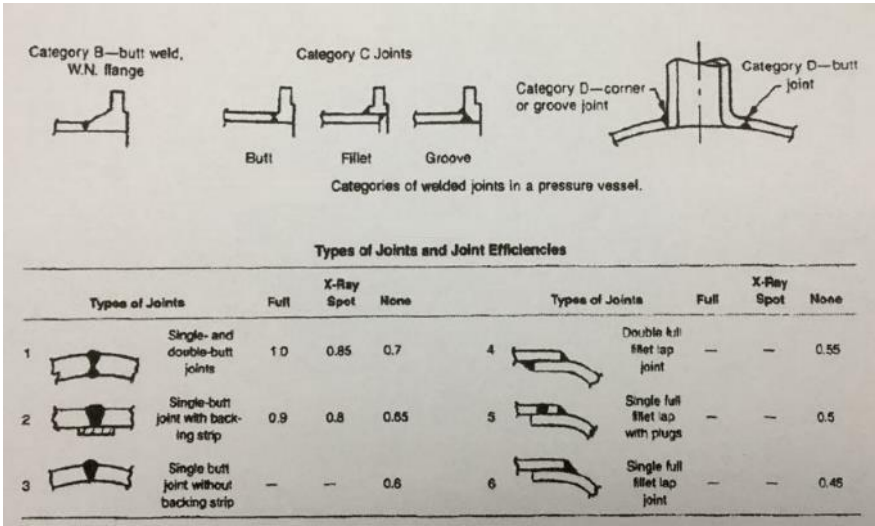


Figura II.1 - Tipos de junta e sua eficiência

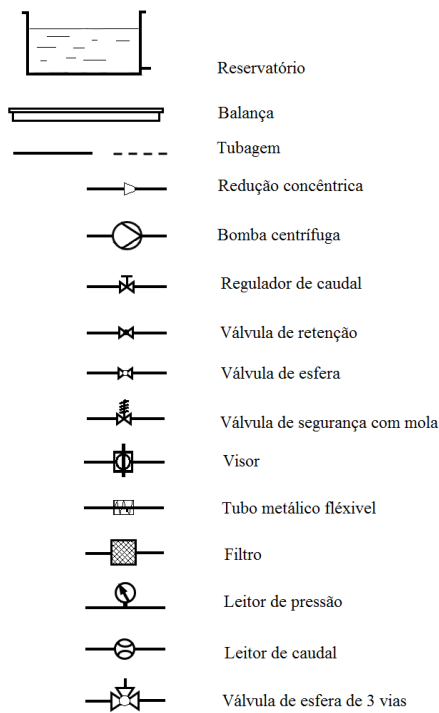


Figura II.2 - Simbologia de esquema hidráulico [63]

COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA SINGULAR, ζ					
$\zeta = \frac{H}{v^2/(2g)}$					
Acessório	Designação	Coeficiente	Acessório	Designação	Coeficiente
	Válvula de globo (abertura total)	10		Curva a 45°	0,2
	Válvula de cunha (abertura total)	0,2		Curva a 180°	2,2
"	Válvula de cunha (3/4 aberta)	0,5		Curva a 180° composta por duas a 90°	0,4
"	Válvula de cunha (1/2 aberta)	2,5		T (da linha para a linha)	0,6
"	Válvula de cunha (1/4 aberta)	13,8		T (da linha para o ramal) $Q_1/Q_2 \approx 0,5 Q_{01}$	1
	Válvula de esfera (abertura total)	0		T (situação simétrica)	1,4
	Válvula de borboleta (abertura total)	1,2		Entrada com aresta viva	0,5
	Válvula de retenção, de batente	1,4		Entrada saliente $l > D/2$	1
	Válvula de retenção, de esfera	5		Entrada com aresta arredondada $R > 0,14 D$	0
	Válvula de pé	9		Entrada cônica $15^\circ < \theta < 30^\circ$	0,2
	Joelho a 90°	0,9		Saída para reservatório	1
	Joelho a 45°	0,4		Alargamento brusco	$(1 - A_1/A_2)^2$ (ref. Montanari)
	Curva a 90°	0,6		Alargamento suave	ver difusor cônico, na pág. seguinte

Figura II.3 - Coeficientes de perda de carga singular [48]

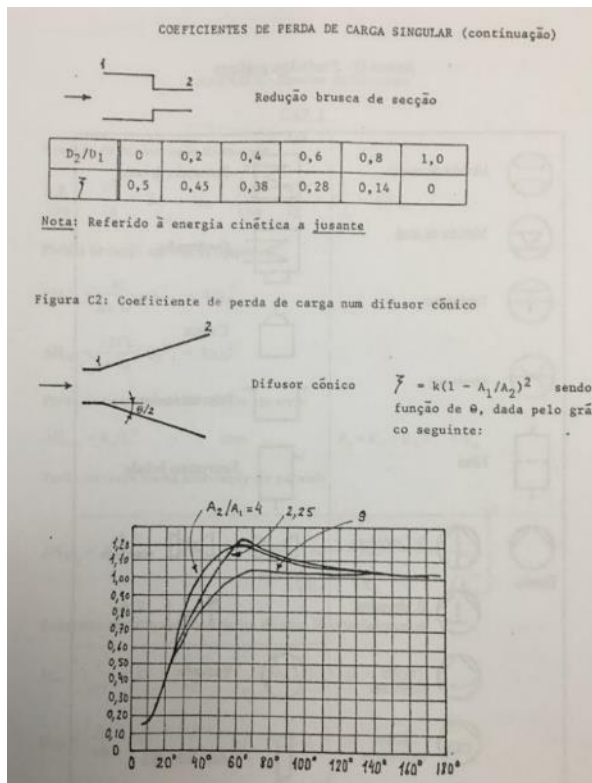


Figura II.4 - Coeficientes de perda de carga singular (continuação) [48]

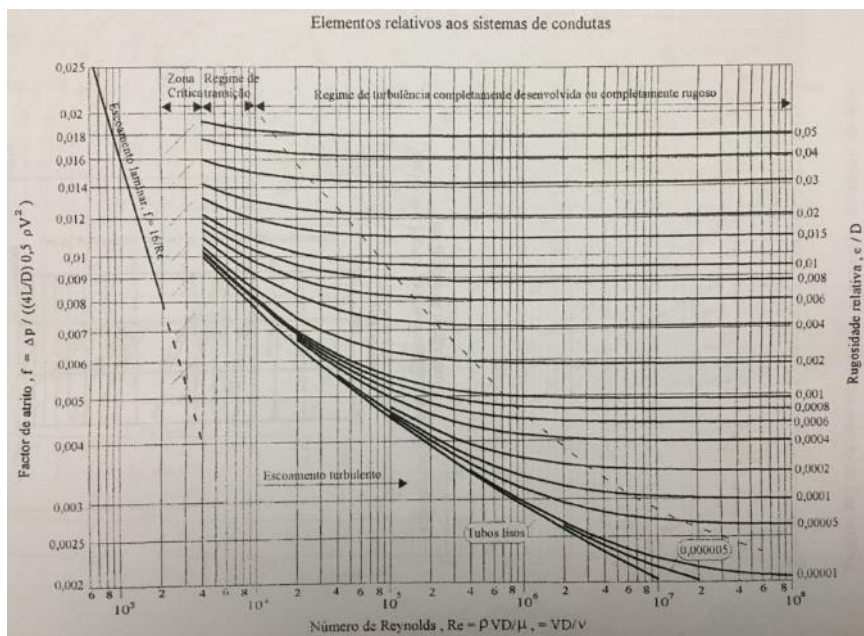
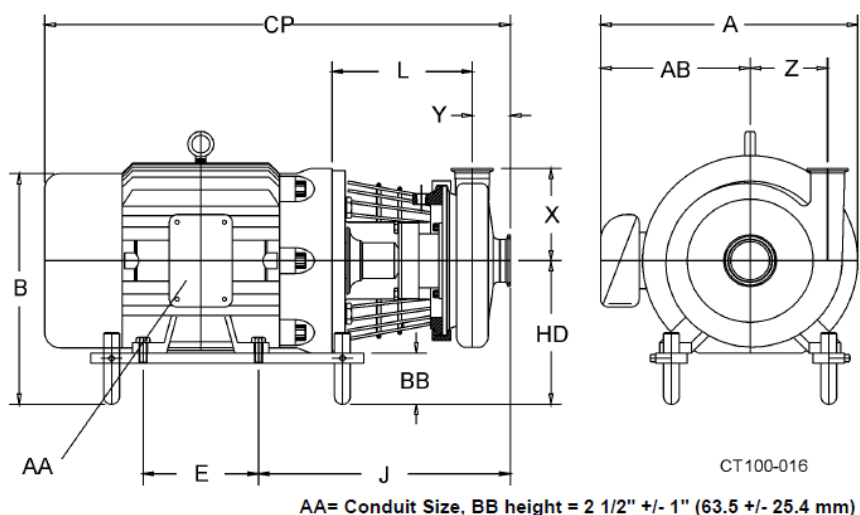


Figura II.5 - Diagrama de Moody [48]

Anexo III – Dimensões dos Acessórios de Catálogo

No seguimento da escolha de acessórios de catálogo e utilização de equipamentos já existentes seguem as dimensões necessárias para a montagem.

Pump Dimensions



Waukesha Cherry-Burrell

Introduction

Table 1: Callouts for Figure 3 - Pump Dimensions with NEMA Motor

Pump Model	NEMA Frame	A	B	CP	J	E	L	HD	AA	AB
C216	140TC	9-11/16" (246 mm)	9-1/2" (241 mm)	19-1/4" (488 mm)	10-27/32" (275 mm)	5" (127 mm)	6-1/16" (154 mm)	6" (152 mm)	3/4" (19 mm)	6-15/16" (176 mm)
	180TC	11-5/8" (295 mm)	11-7/16" (290 mm)	22-1/4" (565 mm)	12-7/32" (310 mm)	5-1/2" (139 mm)	6-11/16" (170 mm)	6-31/32" (177 mm)	3/4" (19 mm)	7-7/8" (200 mm)
	210TC	13-1/8" (333 mm)	12-15/16" (328 mm)	25-13/16" (655 mm)	13-31/32" (354 mm)	6" (152 mm)	7-13/16" (198 mm)	7-23/32" (196 mm)	3/4" (19 mm)	8-7/8" (225 mm)
	250TC	14-1/2" (368 mm)	15-1/32" (381 mm)	31-1/16" (788 mm)	14-1/2" (368 mm)	10" (254 mm)	8-1/2" (216 mm)	8-3/4" (222 mm)	1" (25 mm)	9-1/2" (241 mm)

Table 2: Callouts for Figure 3 - Pump Dimensions with NEMA Motor

Model	Suction	Discharge	X	Y	Z
C216	2" (51 mm) OR 2 1/2" (63 mm)	1 1/2" (38 mm)	4 1/2" (144 mm)	1 15/16" (49 mm)	3 11/16" (93 mm)

Table 3: Mechanical Specifications and Available NEMA Motor Frame Sizes

Pump Model	PORT SIZE		IMPELLER DIAMETER		Available NEMA Motor Frame Size
	Inlet	Discharge	Minimum	Maximum	
C-216	2" (51 mm) 2 1/2" (63 mm)	1 1/2" (38 mm) 1 1/2" (38 mm)	4" (101 mm)	6" (152 mm)	56C-140TC 180TC 210TC 250TC

Figura III.1 - Dimensões da bomba centrífuga [64]

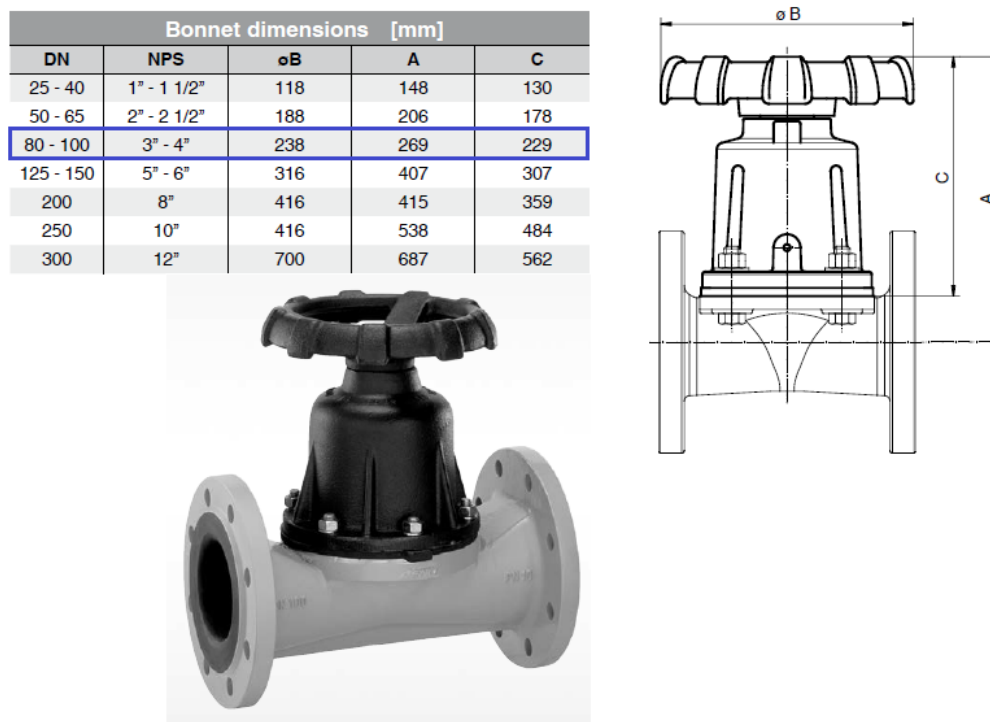



Figura III.2 - Dimensões da válvula de diafragma [37]

Flanges, connection code 52, 53, 58														
DN	NPS	Number of bolt	Connection code 52 53						Connection code 58					
			FTF		ØD	Øk	ØL	H1	FTF		ØD	Øk	ØL	H1
			Body material						Body material					
			Code 8	Code 13, 52					Code 8	Code 13, 52				
25	1"	4	127	127	115	85	14	19.0	127	127	110	79.4	15.9	21.0
40	1 1/2"	4	159	159	150	110	18	28.0	159	159	125	98.4	15.9	30.0
50	2"	4	191	191	165	125	18	35.0	191	191	150	120.7	19.0	37.0
65	2 1/2"	4	216	216	185	145	18	27.5	216	216	180	139.7	19.0	29.5
80	3"	8	254	254	200	160	18	33.0	254	254	190	152.4	19.0	35.0
100	4"	8	305	305	220	180	18	43.0	305	305	230	190.5	19.0	45.0
125	5"	8	356	366	250	210	18	65.0	356	366	255	215.9	22.2	65.0
150	6"	8	406	416	285	240	22	58.0	406	416	280	241.3	22.2	60.0
200	8"	8	521	531	340	295	22	88.0	521	531	345	298.5	22.2	90.0
250	10"	12	635	647	395	350	22	120.5	635	647	405	362.0	22.2	122.5
300	12"	12	749	761	445	400	22	142.5	749	761	485	431.8	22.2	144.5

Flanges EN 1092 / PN16 / form A,
length EN 558, series 7,
ISO 5752, basic series 7

53



53

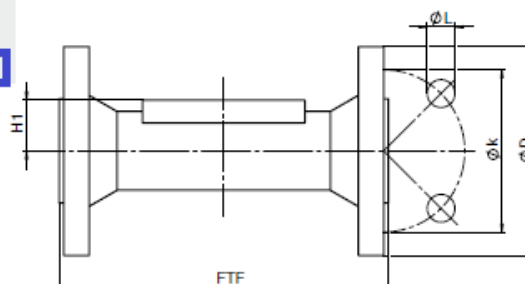


Figura III.3 - Dimensão do corpo da válvula de diafragma [37]

Diaphragm dimensions															
DN	NPS	ϕA	B	ϕC	D	d	e	h	W	H	α	β	γ	γ	Number of bolt holes
25	1"	64	51	90	70	9.0	5	8	1/4"	36	-	-	-	-	4
40	1 1/2"	64	51	90	70	9.0	5	8	1/4"	36	-	-	-	-	4
50	2"	101	82	159	128	13.5	6	10	5/16"	64	-	-	-	-	4
65	2 1/2"	101	82	159	128	13.5	6	10	5/16"	64	-	-	-	-	4
80	3"	175	-	223	-	13.5	6	12	5/16"	80	56°	34°	-	-	6
100	4"	175	-	223	-	13.5	6	12	5/16"	80	56°	34°	-	-	6
125	5"	255	-	287	-	13.5	8	16	5/8"	115	20°	40°	60°	-	8
150	6"	255	-	287	-	13.5	8	16	5/8"	115	20°	40°	60°	-	8
200	8"	305	-	341	-	18.5	8	20	5/8"	145	30°	40°	40°	-	8
250	10"	381	-	410	-	17.0	10	20	5/8"	178	15°	30°	25°	20°	12
300	12"	528	-	576	-	22.0	12	25	1"	280	18°	24°	24°	24°	14

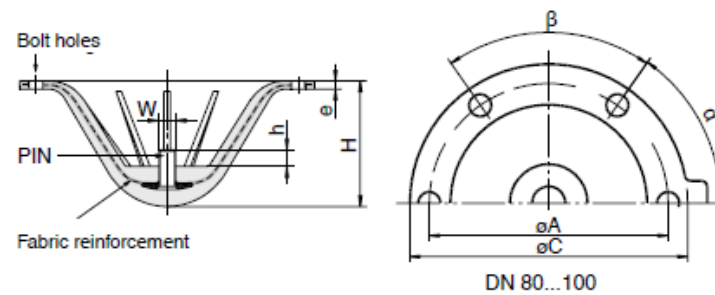
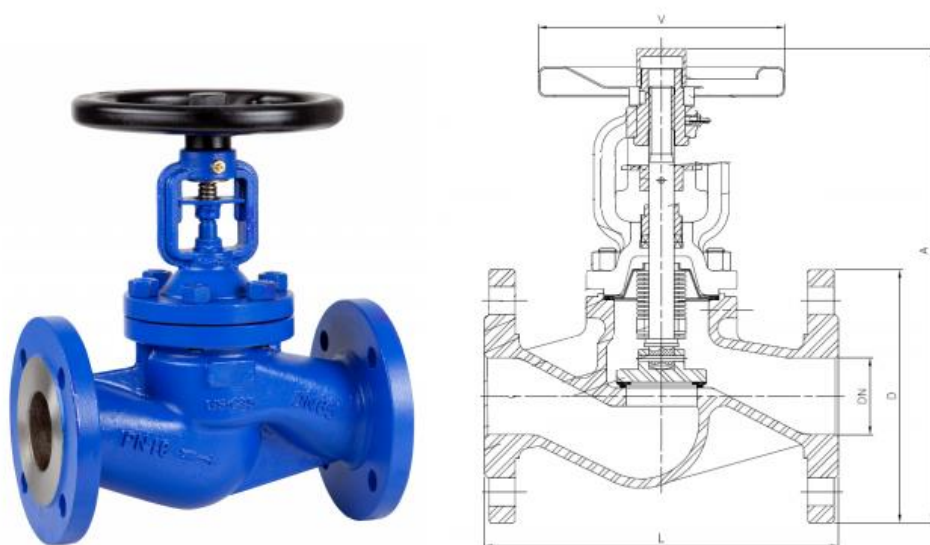


Figura III.4 - Dimensão do diafragma da válvula [37]



Bellow globe valve – Flanged ends DIN PN 16
 Body and bonnet made of carbon steel GS-C25 (WCB).
 Bellow material: stainless steel 304. Gasket and packing: graphite.
 Seal material: stainless steel. Max. working temperature 350°C.
 Flanged ends according to EN 1092 PN16.

Medida / Size	PN	Dimensiones / Dimensions (mm)					Peso / Weight (Kg)
		DN	L	D	A	V	
1/2"	16	15	130	95	195	140	4.3
3/4"	16	20	150	105	200	140	5.3
1"	16	25	160	115	220	140	6.3
1 1/4"	16	32	180	140	225	160	8.0
1 1/2"	16	40	200	150	235	180	9.8
2"	16	50	230	165	250	180	13.5
2 1/2"	16	65	290	185	260	220	19.1
3"	16	80	310	200	265	250	24.0
4"	16	100	350	220	370	300	37.0
5"	16	125	400	250	400	350	62.0
6"	16	150	480	285	515	400	80.0
8"	16	200	600	340	550	500	136.0

Figura III.5 - Dimensões da válvula de globo [35]

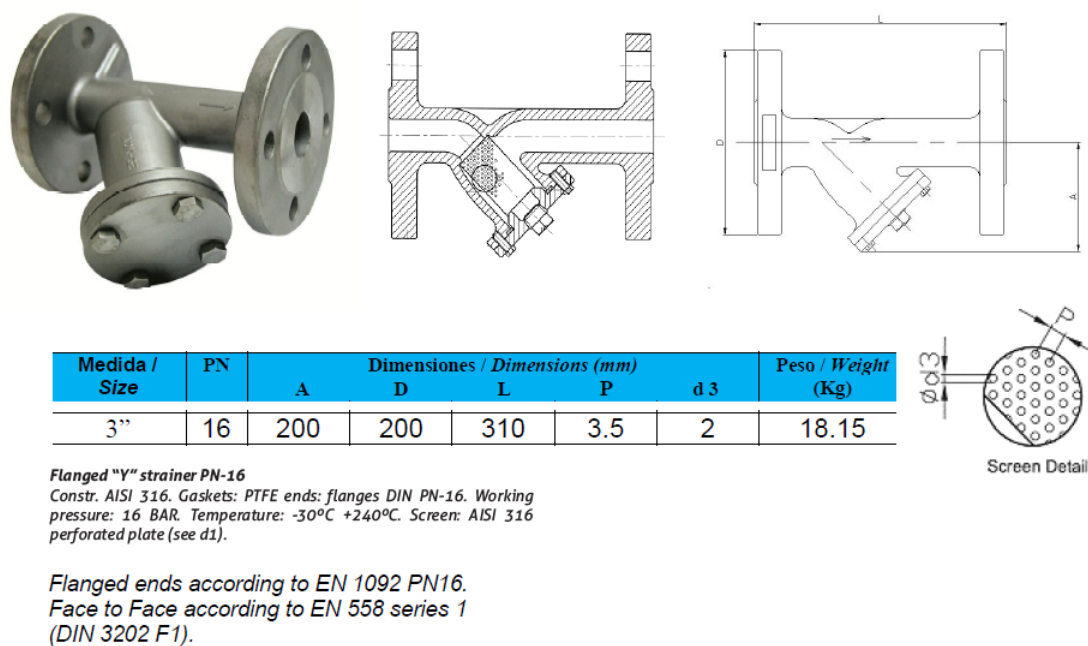


Figura III.6 - Dimensões do Filtro Y [35]

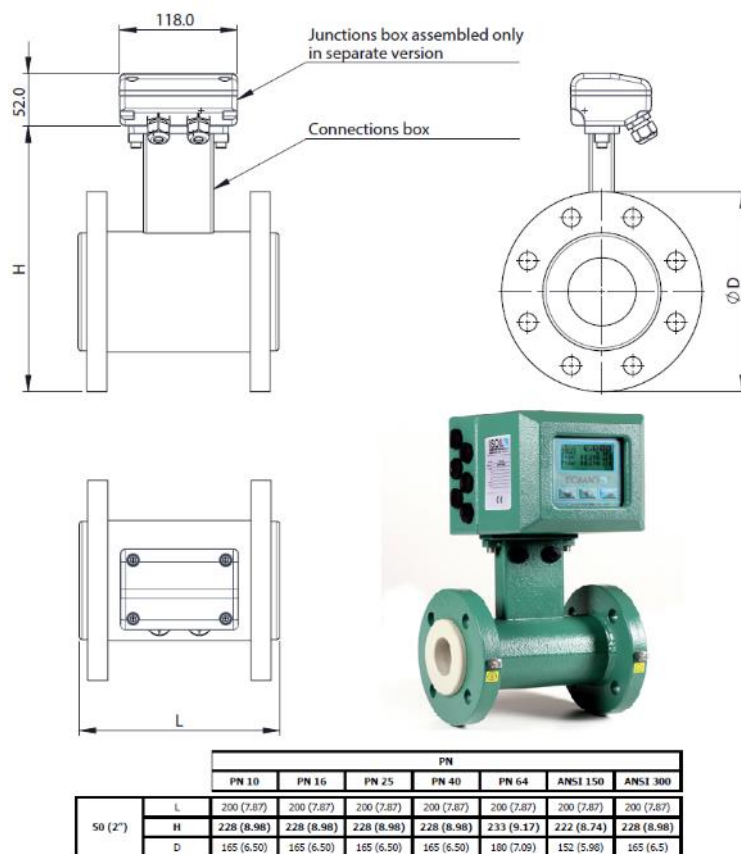


Figura III.7 - Dimensões do caudalímetro electromagnético [65]

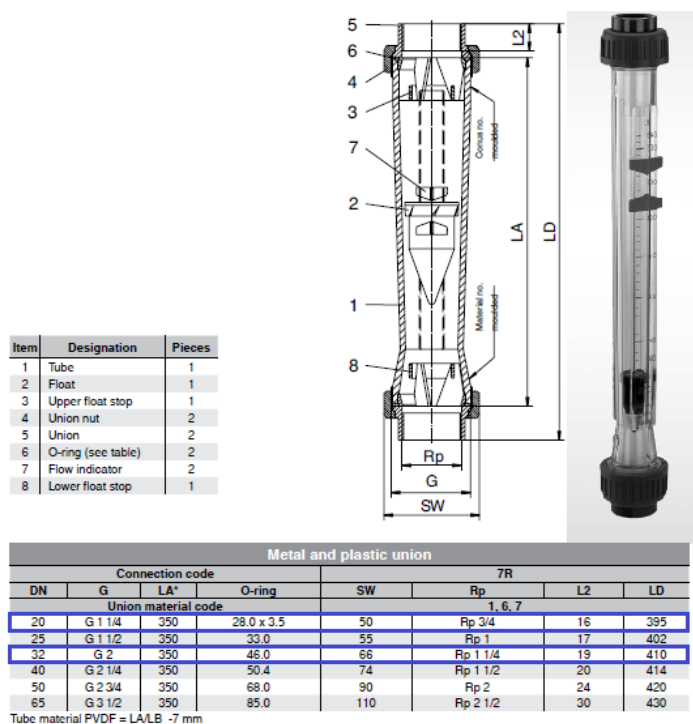


Figura III.8 - Dimensões dos rotâmetros [44]

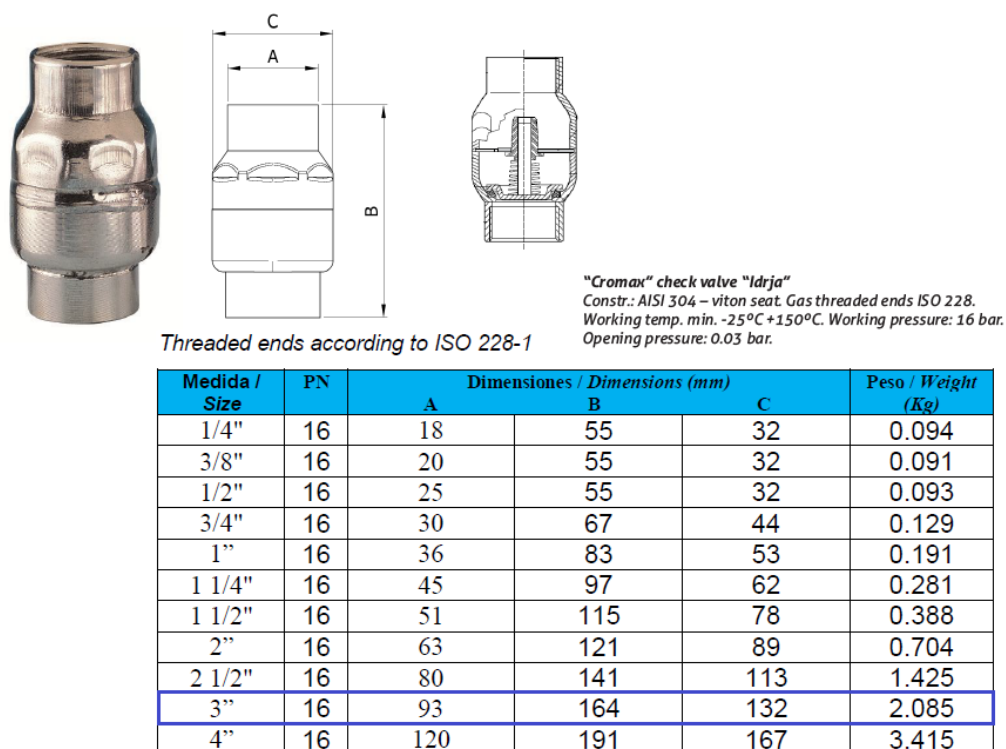
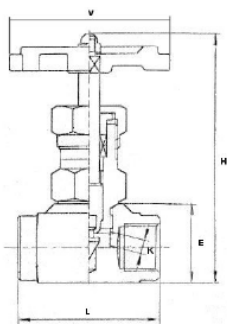


Figura III.9 - Dimensões da válvula de retenção [35]

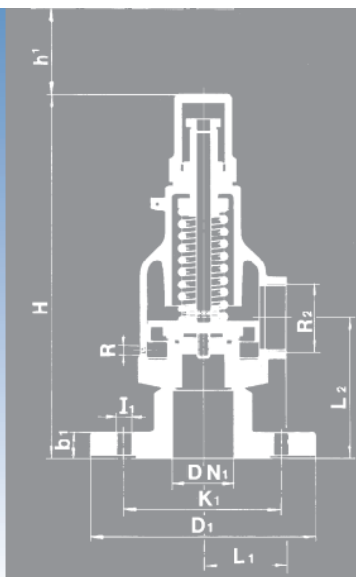


Needle valve – 3000 Lbs
Gas thread F/I.
 Construction: stainless steel A182 F316/needle stainless steel A182 F316 + heat treatment. Stem packing PTFE. Max. working pressure 210 bar. Working temperature -20°C to 250°C.

Threaded ends according to ISO 7-1 (EN 10226-1)

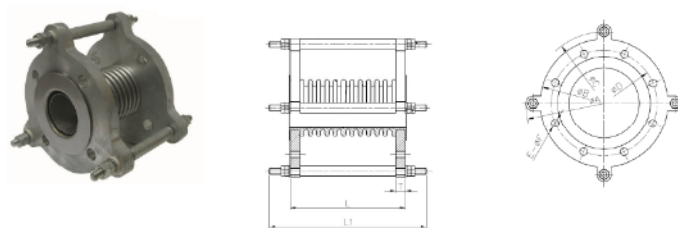
Medida / Size	PN (Lbs)	Dimensiones / Dimensions (mm)					Peso / Weight (Kg)
		E	H	L	K	V	
1/4"	3000	25	85	50	3	63	0.260
3/8"	3000	30	100	55	4	63	0.360
1/2"	3000	34	115	60	6	72	0.530
3/4"	3000	40	120	70	8	72	0.760
1"	3000	45	138	75	9	80	1.175
1 1/4"	3000	57	165	90	11	100	1.850
1 1/2"	3000	67	185	100	15	120	2.900
2"	3000	78	195	120	18	140	4.700

Figura III.10 - Dimensões da válvula de agulha [35]



R ₁ x R ₂ DN ₁ x R ₂		2", 2"		50", 2"	
MODEL		096 AP 096 ES		096 AP 096 ES	
d ₀		45,20			
$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} - S$		1157,60			
H		331 315	334 318	318	
h ¹		80			
L ₁		70			
L ₂		110	113		
R		-			
CONNECTIONS					
INTAKE FLANGE * PN-16 EN-1092-3 • PN-25 EN-1092-1	D ₁	-	165		
	K ₁	-	125		
	I ₁	-	18		
	b ₁	BRONZE BRASS	-	16	
		MIXED S. STEEL	-	20	
	DRILLS N°	-	4		

Figura III.11 - Dimensões da válvula de segurança [63]



Metal expansion joint with internal liner

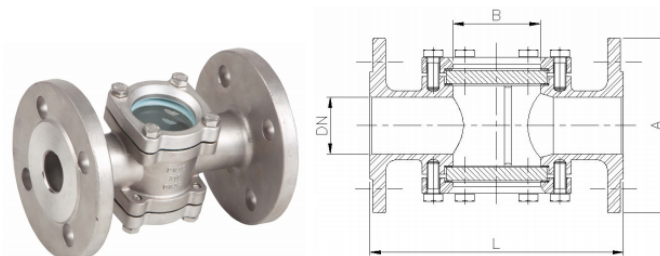
Flanged ends DIN PN-16. Internal liner, bellows and ends: stainless steel AISI 304. Max. working pressure: 16 kg/cm². Max. temp. 300°C.

Ends connecting with flanges EN 1092 PN 16.

Medida / Size	DN	PN	Nº Conv.	Dimensiones / Dimensions (mm)				Peso / Weight (Kg)
				Ø A	Ø B	Ø C	Ø D	
1"	25	16	11	-	115	-	85	2,500
1 ¼"	32	16	11	-	140	-	100	3,500
1 ½"	40	16	11	-	150	-	110	4,000
2"	50	16	11	235	165	195	125	7,150
2 ½"	65	16	11	255	185	215	145	8,950
3"	80	16	12	270	200	230	160	9,800
4"	100	16	12	305	220	250	180	12,650
5"	125	16	11	360	250	287	210	18,450
6"	150	16	12	390	285	322	240	24,350
8"	200	16	12	430	340	377	295	28,900

Medida / Size	DN	PN	Dimensiones / Dimensions (mm)				
			E - Ø F	Tirantes / Rods	L	L1	T
1"	25	16	4 - 14	-	150	-	16
1 ¼"	32	16	4 - 18	-	150	-	16
1 ½"	40	16	4 - 18	-	150	-	16
2"	50	16	4 - 18	3 x M12	150	225	16
2 ½"	65	16	4 - 18	3 x M12	150	225	18
3"	80	16	8 - 18	3 x M12	150	225	18
4"	100	16	8 - 18	3 x M12	150	225	20
5"	125	16	8 - 18	4 x M16	150	245	20
6"	150	16	8 - 23	4 x M16	200	295	23
8"	200	16	12 - 23	4 x M16	200	295	23

Figura III.12 - Dimensões da junta extensível [35]

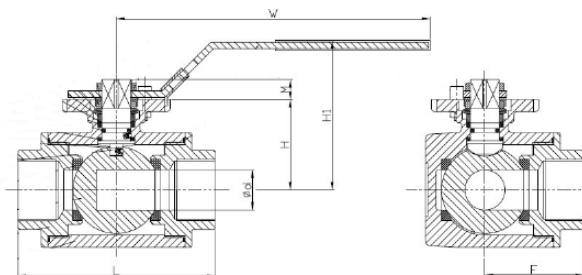


Sight glass, double glass

Constr. body stainless steel AISI 316. Ends: flanges din PN-16. Glass: normal with thermal treatment on request: "pyrex" glass. Max. working pressure: 16 BAR at 50°C. Max. working temp.: 200°C at 10 BAR.

Medida / Size	PN	DN	Dimensiones / Dimensions (mm)			Cristal / Glass	Peso / Weight (Kg)
			L	A	B		
1/2"	16	15	130	95	40	Ø 50 x 8	2.250
3/4"	16	20	150	105	40	Ø 50 x 8	2.800
1"	16	25	160	115	50	Ø 63 x 10	3.650
1 1/4"	16	32	180	140	50	Ø 63 x 10	5.750
1 1/2"	16	40	200	150	65	Ø 80 x 12	8.300
2"	16	50	230	165	65	Ø 80 x 12	9.800
2 1/2"	16	65	290	185	100	Ø 115 x 15	13.700
3"	16	80	310	200	100	Ø 115 x 15	16.650
4"	16	100	350	220	125	Ø 145 x 15	23.800

Figura III.13 - Dimensões do visor de escoamento [35]



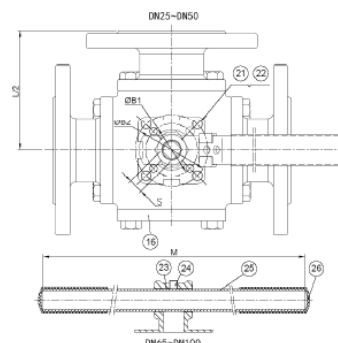
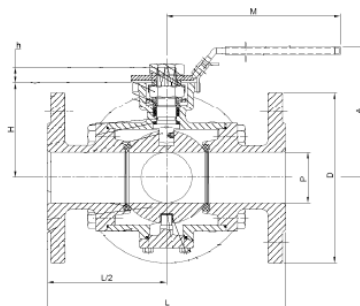
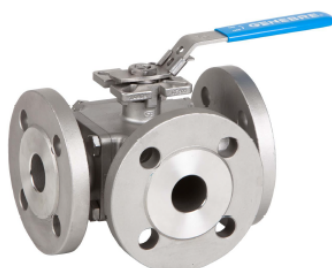
**3 Ways ball valve reduced bore
"T" bore**

Const.: AISI 316; Four seats PTFE + GF body and stem seats: PTFE o'ring stem: Viton. Gas threaded ends ISO 7-1 (EN 10226-1). PN 63. Temp. -25°C +180°C. Direct assembling S/ISO 5211. Manually operated by handle with locking system.

Threaded ends according to ISO 7-1 (EN 10226-1)

Medida / Size	PN	d	L	H	H1	W	M	F	C x C	ISO 5211	Peso / Weight (Kg)
1/4"	63	9.5	75	37	66	130	7	37	9 x 9	F03 / F04	0,700
3/8"	63	11	75	37	66	130	7	37	9 x 9	F03 / F04	0,670
1/2"	63	12	75	37	66	130	7	37	9 x 9	F03 / F04	0,630
3/4"	63	15	85	41	72	161	7	42	11 x 11	F04 / F05	0,950
1"	63	20	100	47	77	161	7	50	11 x 11	F04 / F05	1,400
1 1/4"	63	25	122	56	92	203	7	61	14 x 14	F05 / F07	2,900
1 1/2"	63	32	131	60	96	203	12	65	14 x 14	F05 / F07	3,600
2"	63	40	158	71	107	203	12	79	14 x 14	F05 / F07	6,250
2 1/2"	63	49	178	95	135	254	14	89	17 x 17	F07 / F10	8,720

Figura III.14 - Dimensões da válvula de 3 vias de 1 1/4" [35]



**Flanges DIN PN40 < DN50. Flanges DIN PN16 > DN50
3 ways full bore ball valve. "T" bore**

Direct mounting for actuators ISO 5211.
Body: stainless steel CF8M (316). 4 seats: PTFE + 15% GF.
Max. pressure: 16/40 kg/cm² depending on size.
Temp.: -30°C +180°C. Manually operated by handle.

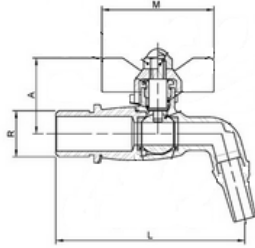
Flanges ends according to EN 1092
PN40 from DN 25 to DN 50
PN16 from DN 65 to DN 100

Medida/ Size	PN	P	L	ØD	H	A	M	S	h	ISO 5211 (ØB1/B2)	Peso / Weight (Kg)
1"	40	25	180	115	68	99	175	11	11	F04/F05	8,600
1 1/4"	40	32	190	140	72	103	175	11	11	F04/F07	11,800
1 1/2"	40	38	212	150	85	119	200	14	14	F05/F07	14,700
2"	40	49	230	165	92	126	200	14	14	F05/F07	19,700
2 1/2"	16	63	290	185	107	172	400	17	17	F07/F10	33,300
3"	16	75	310	200	119	187	400	17	18	F07/F10	47,100
4"	16	99	350	220	150	214	400	22	22	F10	73,700

Figura III.15 - Dimensões da válvula de 3 vias de 3" [35]

Torneira de bica inox

Válvula de esfera com passo reduzido. Construção em aço inoxidável AISI 316. Entrada roscada GAS (BSP) macho segundo ISO 228/1. Accionamento manual mediante manípulo de borboleta em aço inox. Acabamento polido. Pressão máxima de trabalho 16 bar (PN16). Temperatura de trabalho desde 0°C a 100°C. Vedantes em PTFE.



Medida (R)	Dimensões			Peso (Kg)
	A	L	M	
3/8"	34	85	50	0,174
1/2"	34	85	50	0,185
3/4"	43	106	63	0,331

Figura III.16 - Dimensões da torneira de bica [46]

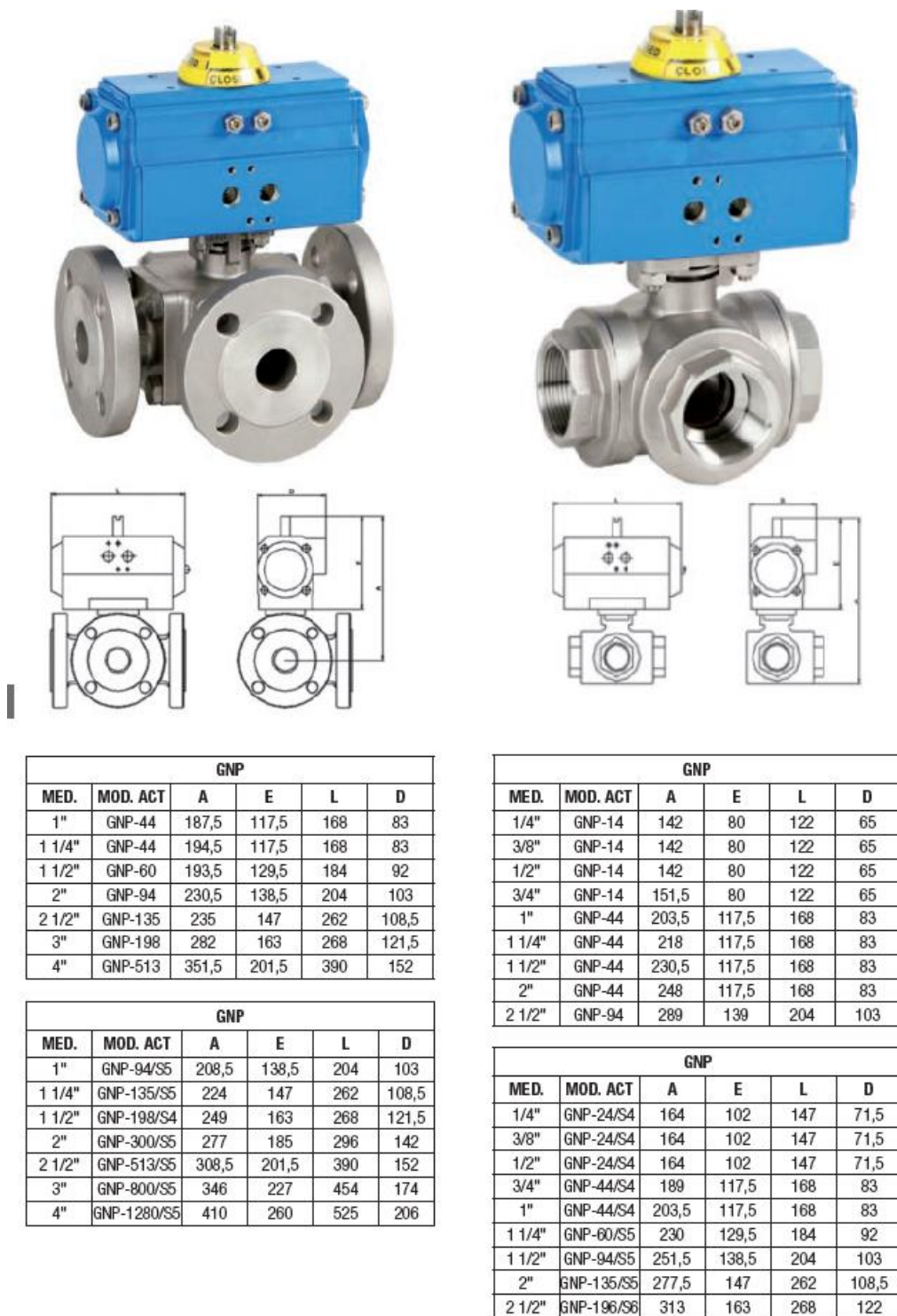


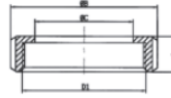
Figura III.17 - Dimensões do atuador GNP [35]



Threaded ring for welded connector

Standards applied: DIN 11851. Stainless steel body AISI 304.
Superficial ending: polish.

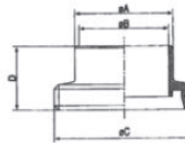
MED.	DN	A	B	C	D1
1/2"	15	18	44	25	34 x 1/8"
3/4"	20	20	54	31	44 x 1/6"
1"	25	21	63	36	52 x 1/6"
1 1/4"	32	21	70	42	58 x 1/6"
1 1/2"	40	21	78	49	65 x 1/6"
2"	50	22	92	62	78 x 1/6"
2 1/2"	65	25	112	80	95 x 1/6"
3"	80	29	127	94	110 x 1/4"
4"	100	31	148	115	130 x 1/4"



Male connection for welding

Standards applied: DIN 11851. Stainless steel body AISI 304.
Superficial ending: polish.

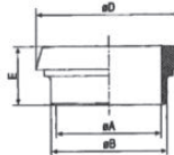
MED.	DN	A	B	C	D
1/2"	15	21	16	34 x 1/8"	21
3/4"	20	25	20	44 x 1/6"	24
1"	25	31	26	52 x 1/6"	29
1 1/4"	32	37	32	58 x 1/6"	32
1 1/2"	40	43	38	65 x 1/6"	33
2"	50	55	50	78 x 1/6"	35
2 1/2"	65	72	66	95 x 1/6"	40
3"	80	87	81	110 x 1/4"	45
4"	100	106	100	130 x 1/4"	54



Clamp for welding

Standards applied: DIN 11851. Stainless steel body AISI 304.
Superficial ending: polish.

MED.	DN	A	B	D	E
1/2"	15	16	21	28,5	17
3/4"	20	20	25	36,5	18
1"	25	26	31	44	22
1 1/4"	32	32	37	50	25
1 1/2"	40	38	43	56	26
2"	50	50	55	68,5	28
2 1/2"	65	66	72	86	32
3"	80	81	87	100	37
4"	100	100	106	121	44



O'ring for DIN 11851 connector

Material: EPDM.

MED.	DN	A	B	C
1/2"	15	4,5	18	26
3/4"	20	4,5	23	33
1"	25	5	30	40
1 1/4"	32	5	36	46
1 1/2"	40	5	42	52
2"	50	5	54	64
2 1/2"	65	5	71	81
3"	80	5	85	95
4"	100	5	104	114

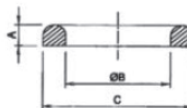
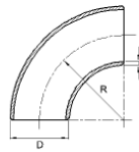


Figura III.18 - União à bomba - União DIN [66]

Curva 90° sem costura - Curva sem costura Schedule ASTM

Qualidades: Aço inox AISI 304L, 316L

Acabamento: 2B

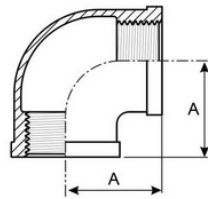


Diâmetro		Espessura (T)				Raio(R)	Raio(R)	Raio Longo/Peso				Raio Curto/Peso			
DN	Ø D	Sch 5S	Sch 10S	Sch 40S	Sch 80S	Longo	Curto	Sch 5S	Sch 10S	Sch 40S	Sch 80S	Sch 5S	Sch 10S	Sch 40S	Sch 80S
Poleg.	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
1/2"	21,34	1,65	2,11	2,77	3,73	38,10		0,05	0,06	0,08	0,10				
3/4"	26,67	1,65	2,11	2,87	3,91	28,50		0,06	0,08	0,10	0,10				
1"	33,40	1,65	2,77	3,38	4,55	38,10	25,40	0,08	0,12	0,15	0,20	0,08	0,09	0,12	0,13
1 1/4"	42,16	1,65	2,77	3,56	4,85	47,60	31,80	0,12	0,20	0,26	0,35	0,10	0,15	0,20	0,22
1 1/2"	48,26	1,65	2,77	3,68	5,08	57,20	38,10	0,17	0,28	0,37	0,50	0,11	0,19	0,24	0,32
2"	60,33	1,65	2,77	3,91	5,54	76,20	50,80	0,29	0,48	0,65	0,93	0,19	0,32	0,43	0,60
2 1/2"	73,03	2,11	3,05	5,16	7,01	95,30	63,50	0,58	0,80	1,37	1,79	0,38	0,54	0,90	1,13
3"	88,90	2,11	3,05	5,49	7,62	114,30	76,20	0,81	1,14	2,04	2,87	0,54	0,76	1,36	1,82

Figura III.19 - Dimensões da Curva 90° [46]

Joelho roscado 90° FF - Joelhos roscados FF

Qualidade: Aço inox AISI 316

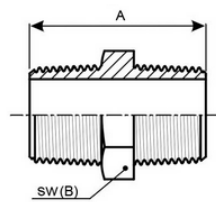


Medida	A	B	C
Ø	mm	mm	mm
1/8"	17	-	-
1/4"	19	-	-
3/8"	25	-	-
1/2"	28	-	-
3/4"	33	-	-
1"	38	-	-
1 1/4"	45	-	-
1 1/2"	48	-	-
2"	58	-	-
2 1/2"	69	-	-
3"	78	-	-
4"	96	-	-

Figura III.20 - Dimensão joelho 90° roscado [46]

Casquilho duplo sextavado MM - Casquilho sextavado MM

Qualidade: Aço inox AISI 316

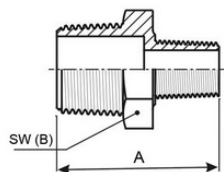


Medida Ø	A mm	B mm	C mm
1/8"	25	12	-
1/4"	35	14	-
3/8"	37	20	-
1/2"	41	23	-
3/4"	46	27	-
1"	50	36	-
1 1/4"	56	46	-
1 1/2"	58	50	-
2"	66	65	-
2 1/2"	79	80	-
3"	83	92	-
4"	96	118	-

Figura III.21 - Dimensões do casquilho duplo sextavado [46]

Casquilho duplo redução MM - Casquilho duplo redução MM

Qualidade: Aço inox AISI 316

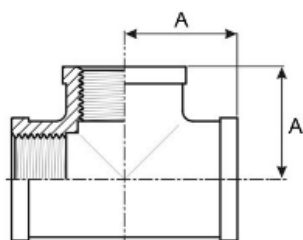


Medida Ø	A mm	B mm	C mm
1/4" X 1/8"	31	17	-
3/8" X 1/8"	35	19	-
3/8" X 1/4"	35	19	-
1/2" X 1/4"	40	23	-
1/2" X 3/8"	40	23	-
3/4" X 3/8"	42	29	-
3/4" X 1/2"	45	29	-
1" X 1/2"	47	36	-
1" X 3/4"	53	36	-
1 1/4" X 1/2"	56	46	-
1 1/4" X 3/4"	52	46	-
1 1/4" X 1"	53	46	-
1 1/2" X 3/4"	50	54	-
1 1/2" X 1"	55	54	-

Figura III.22 - Dimensões do casquilho duplo redução [46]

Tê roscado FFF - Tês roscados FFF

Qualidade: Aço inox AISI 316

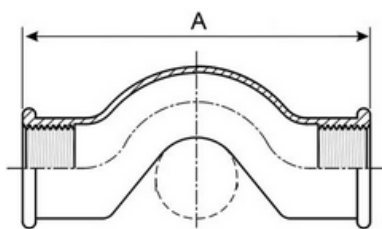


Medida Ø	A mm	B mm	C mm
1/8"	17	-	-
1/4"	19	-	-
3/8"	25	-	-
1/2"	28	-	-
3/4"	33	-	-
1"	38	-	-
1 1/4"	45	-	-

Figura III. 23 - Dimensão do Tê

União de cruzamento FF - União cruzamento FF

Qualidade: Aço inox AISI 316



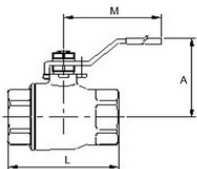
Medida Ø	A mm	B mm	C mm
3/8"	78	-	-
1/2"	91	-	-
3/4"	106	-	-
1"	119	-	-
1 1/4"	150	-	-

Figura III.24 - Dimensão de união de cruzamento [46]

Válvula esfera 2 peças rosca inox

Válvula de esfera passo total de 2 peças. Construção em aço inox, CF 8M S(316) microfusão. Extremos rosca GAS DIN 2999. Juntas e vedantes PTFE+15% FV. O-ring do eixo em Viton, PN 63. Temperatura -25° + 180°C. Comando manual por alavanca com sistema de bloqueio.

Qualidade: Aço inox AISI 316



Medida	PN	Dimensões				Peso (Kg)
		P	A	L	M	
1/4"	63	11	50	50	104	0,207
3/8"	63	12,7	50	50	104	0,195
1/2"	63	15	51,5	55	104	0,237
3/4"	63	20,6	62	70	122	0,442
1"	63	25,4	65	83	122	0,606
1 1/4"	63	31,8	82	91	180	1,084
1 1/2"	63	38,1	88	103	180	1,544
2"	63	50,8	106	120	219	2,648
2 1/2"	63	55	119	152	230	4,707
3"	63	80	135	172	275	7,288

Figura III.25 - Dimensões da válvula de esfera [46]

TIPO F C/BORRACHA M8 (AÇO INOXIDÁVEL AISI 304)_ TYPE F WITH RUBBER M8 (STAINLESS STEEL AISI 304)

Ø MÉDIO MIDDLE MM	APERTO SQUEEZE MM	MEDIDA SIZE INCH	PARAF. LAT. SIDE BOLT	M
18	16 - 20	3/8"	M6 X 16	M8
22	21 - 26	1/2"	M6 X 16	M8
28	26 - 31	3/4"	M6 X 16	M8
35	33 - 38	1"	M6 X 16	M8
40	40 - 45	1 1/4"	M6 X 16	M8
48	47 - 52	1 1/2"	M6 X 20	M8
54	52 - 57		M6 X 20	M8
60	60 - 65	2"	M6 X 20	M8
75	72 - 77	2 1/2"	M6 X 20	M8
84	81 - 86		M6 X 20	M8
90	87 - 94	3"	M6 X 20	M8

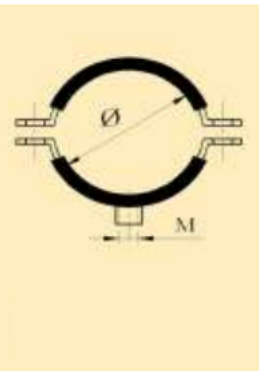


Figura III.26 - Dimensões das Abraçadeiras

Anexo IV – Diferentes Estágios de Conceção ao Longo do Tempo

Inicialmente apresentou-se uma ideia simples e económica que não satisfazia os objetivos propostos, sendo necessário um projeto mais complexo.

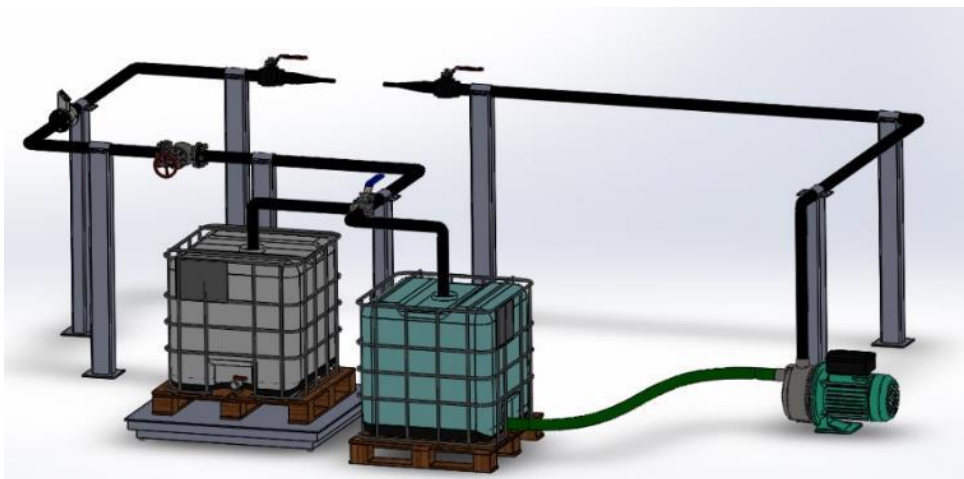


Figura IV.1 - Primeira conceção do projeto

O projeto passou para um estágio mais complexo que se verificou não funcionar da maneira pretendida.

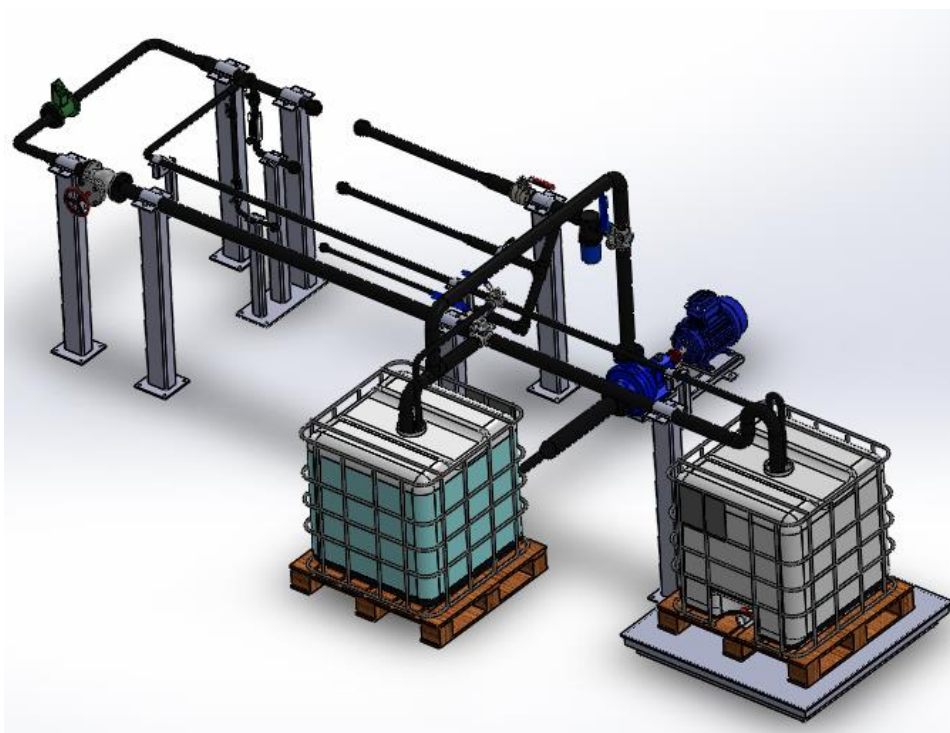


Figura IV.2 - Segunda conceção do projeto

Foi feita uma correção e a terceira conceção apresenta-se já próxima do projeto final.

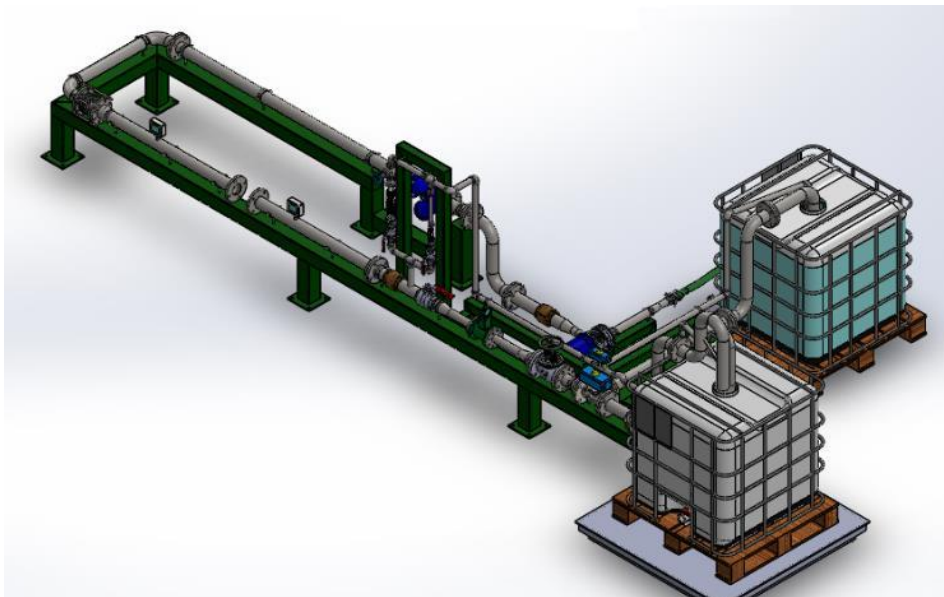


Figura IV.3 - Terceira conceção do projeto

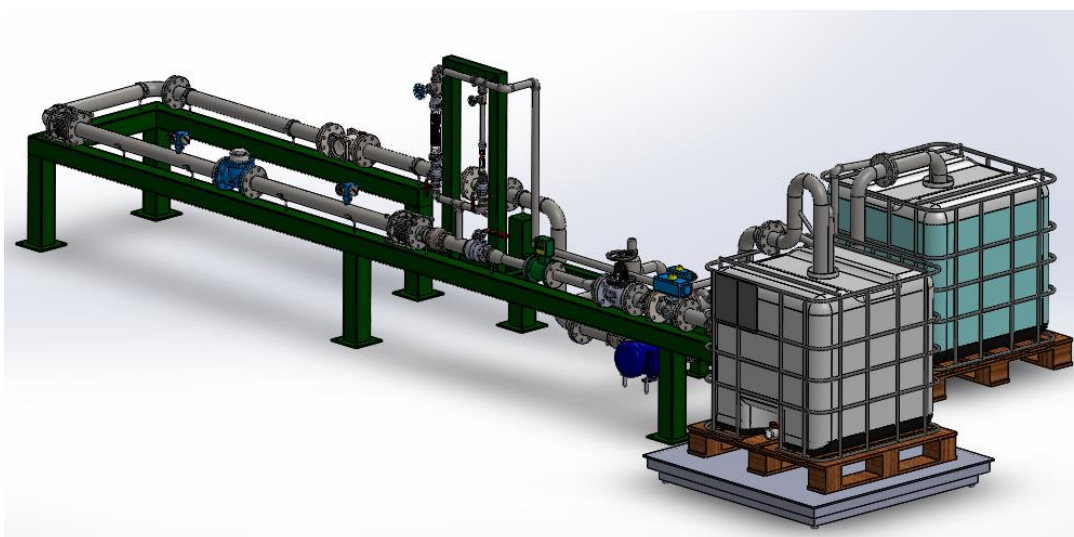


Figura IV.4 - Conceção Final (1)

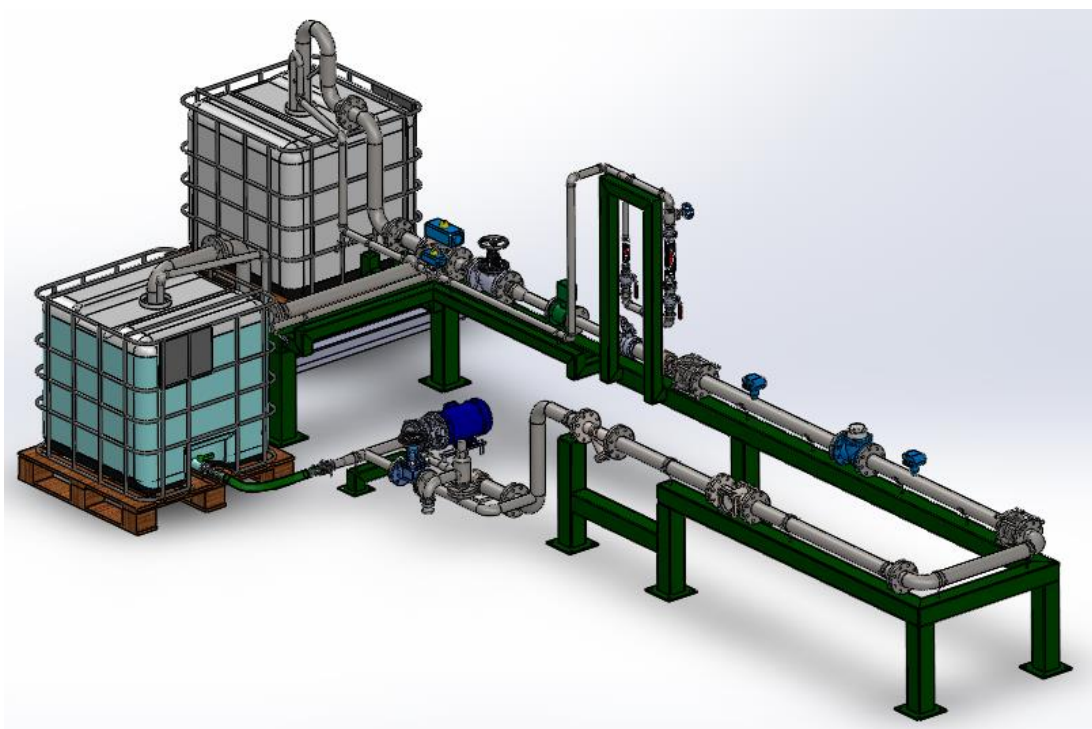


Figura IV.5 - Conceção Final (2)

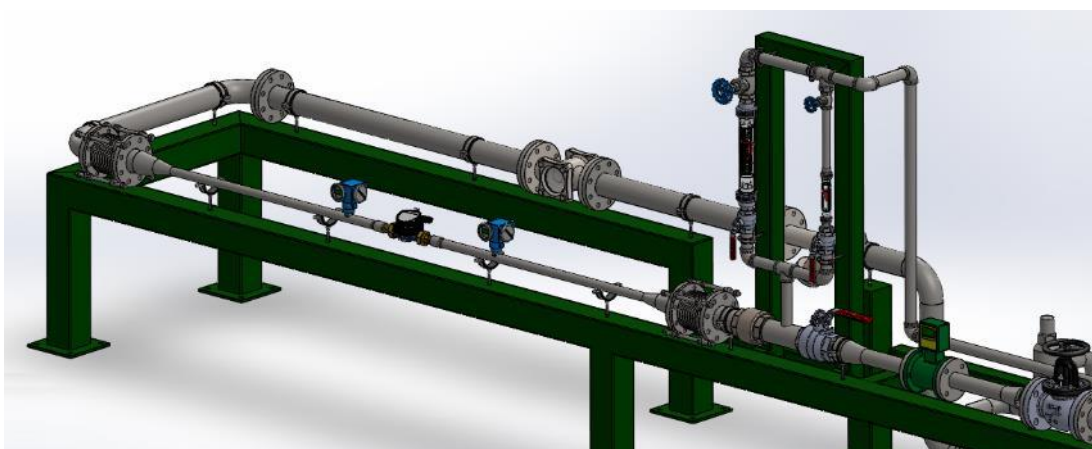


Figura IV.6 - Conceção Final (3)

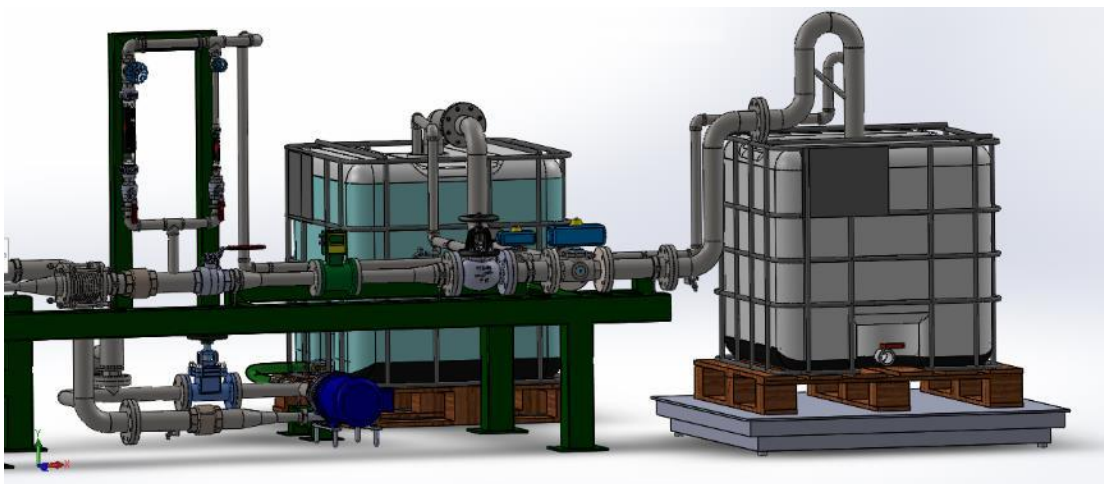


Figura IV.7 - Conceção Final (4)

O projeto foi finalizado com a colocação do BE próximo da plataforma metálica, respeitando o layout planeado e com a colocação de um terceiro reservatório que permite o escoamento por gravidade.

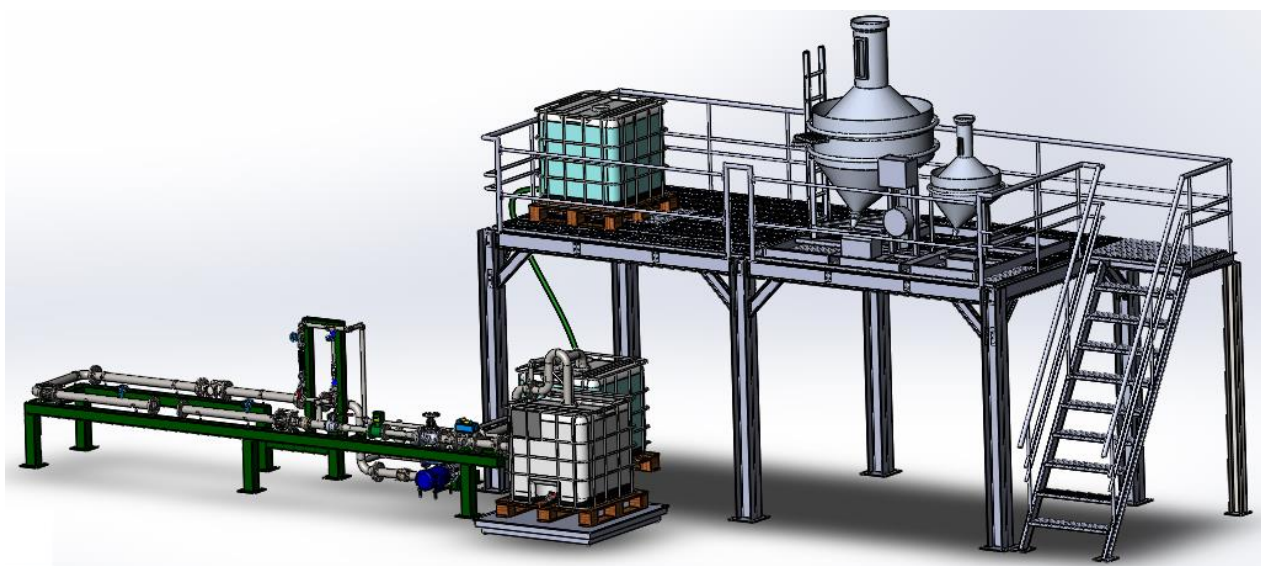
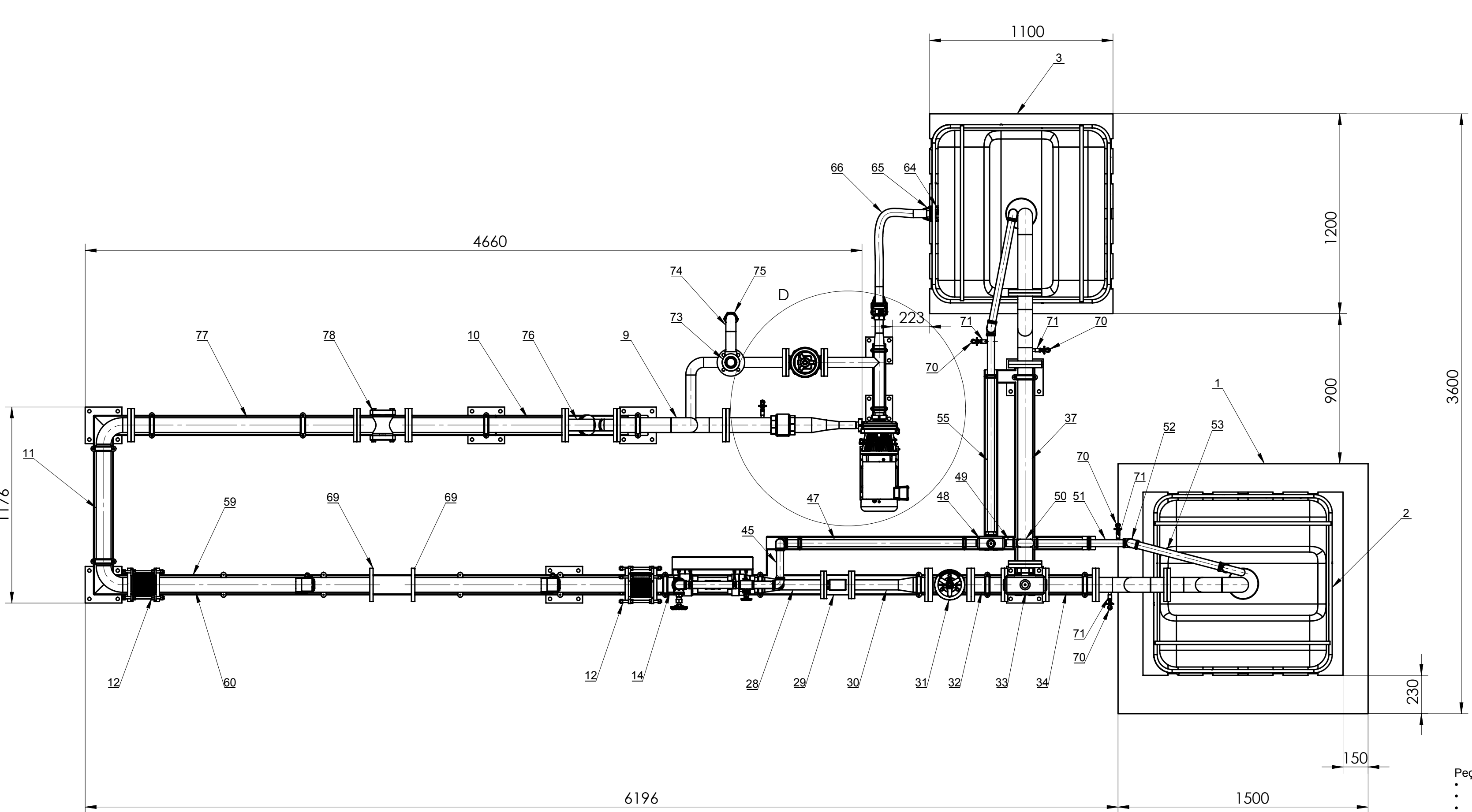
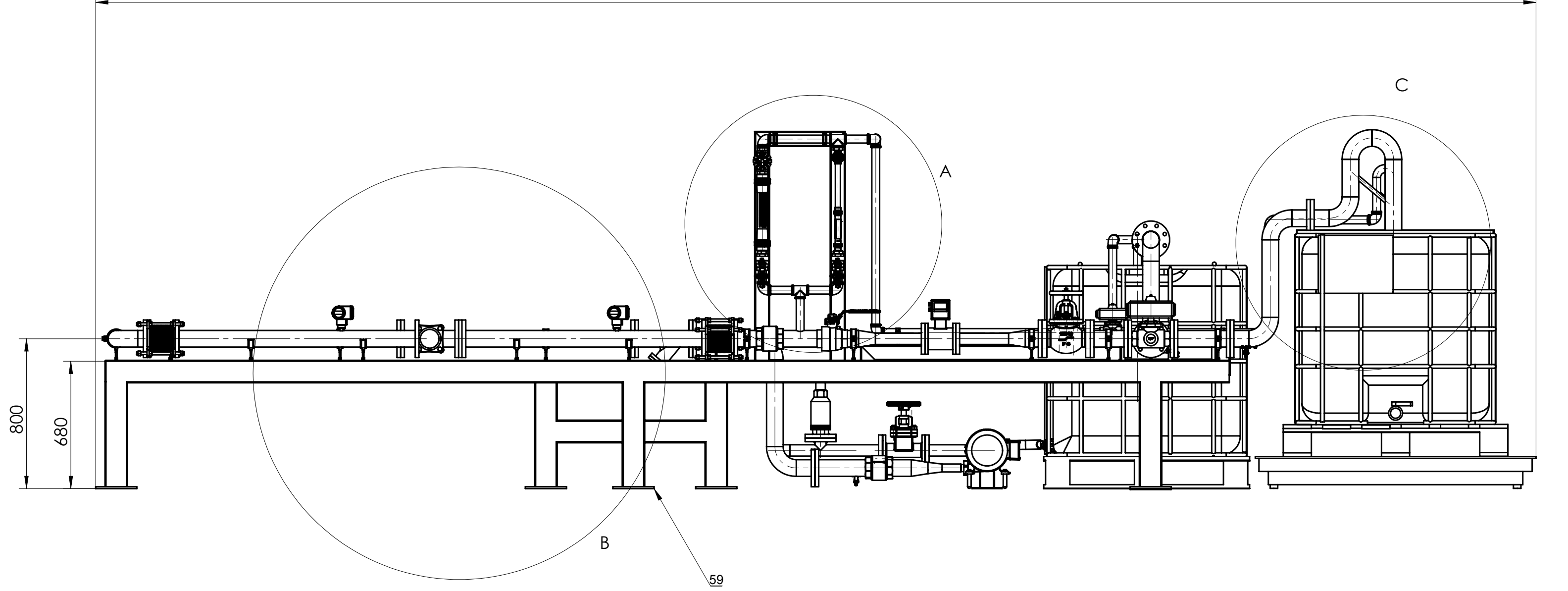
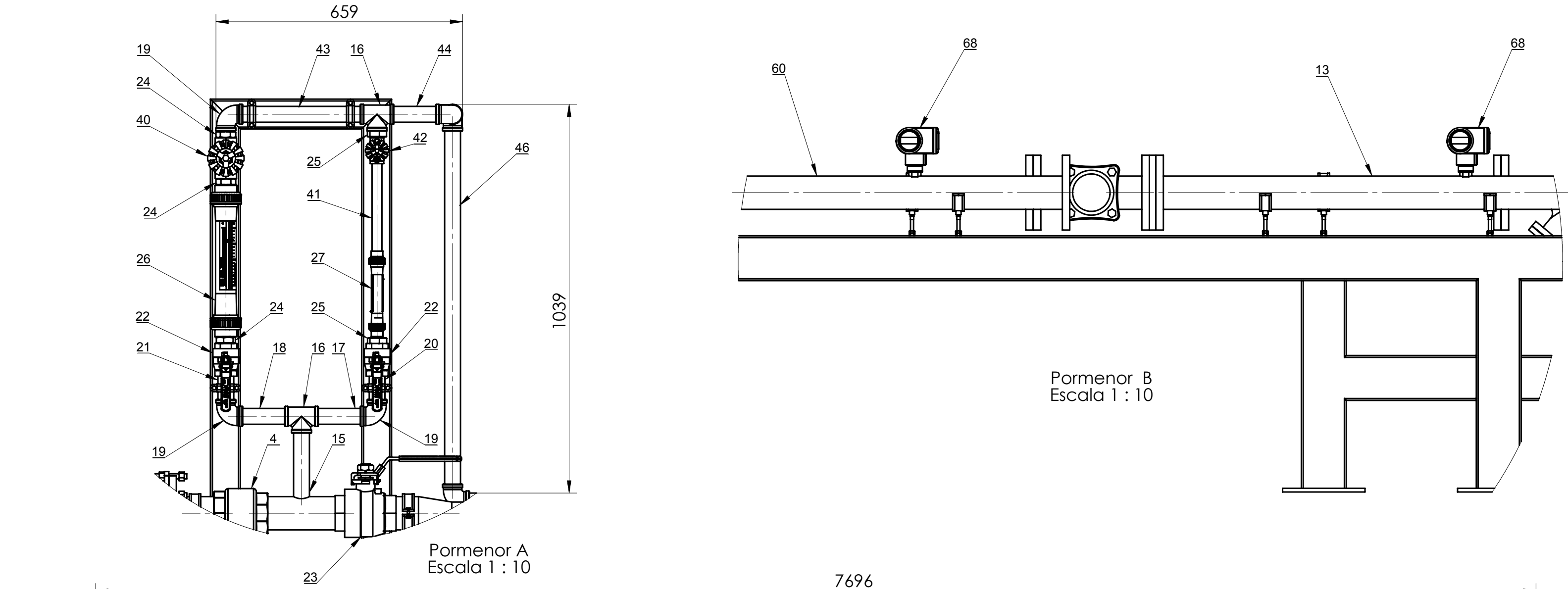


Figura IV. 8 - Conceção Final e Plataforma metálica

Anexo V – Desenhos de Construção Mecânica

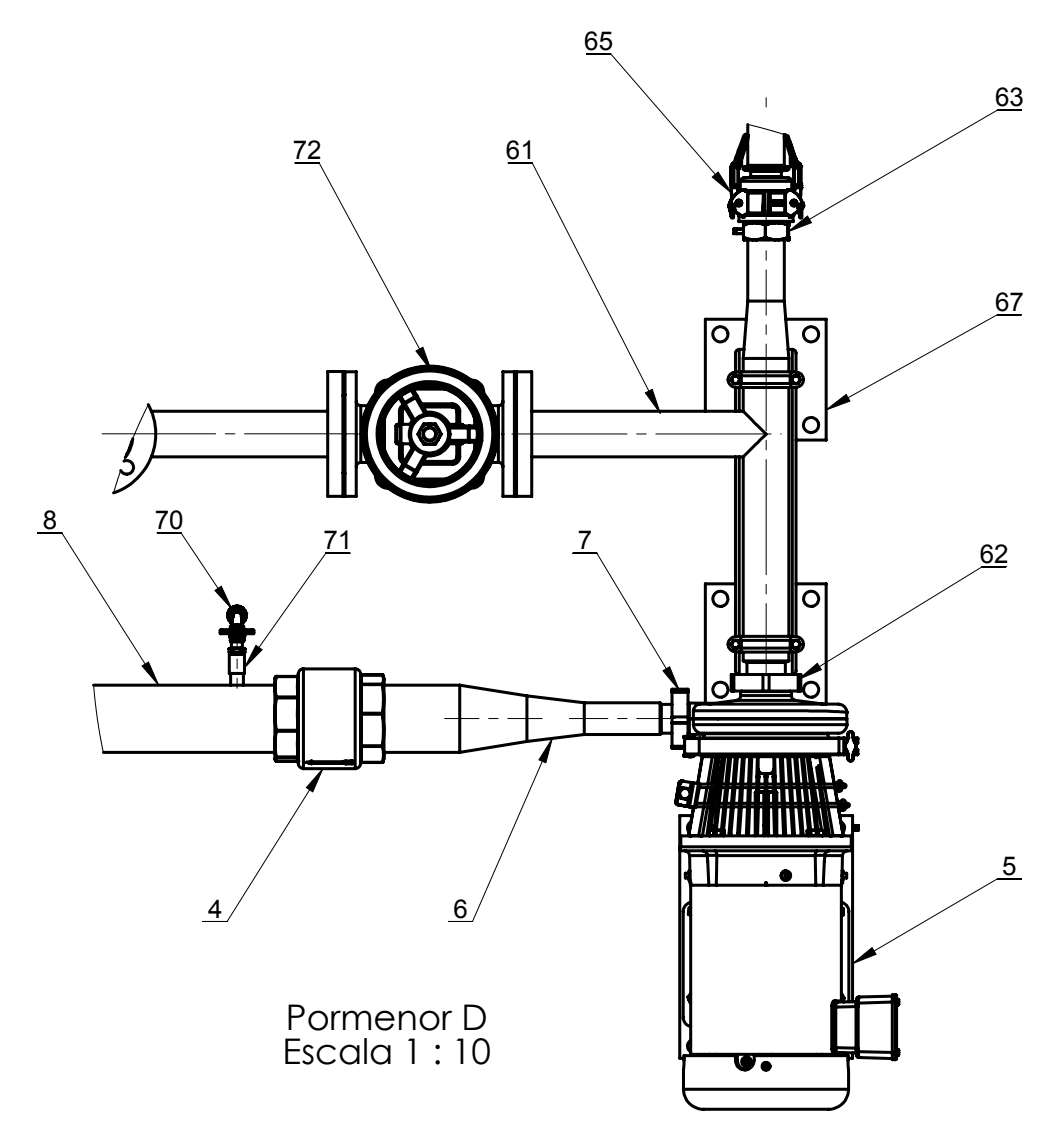
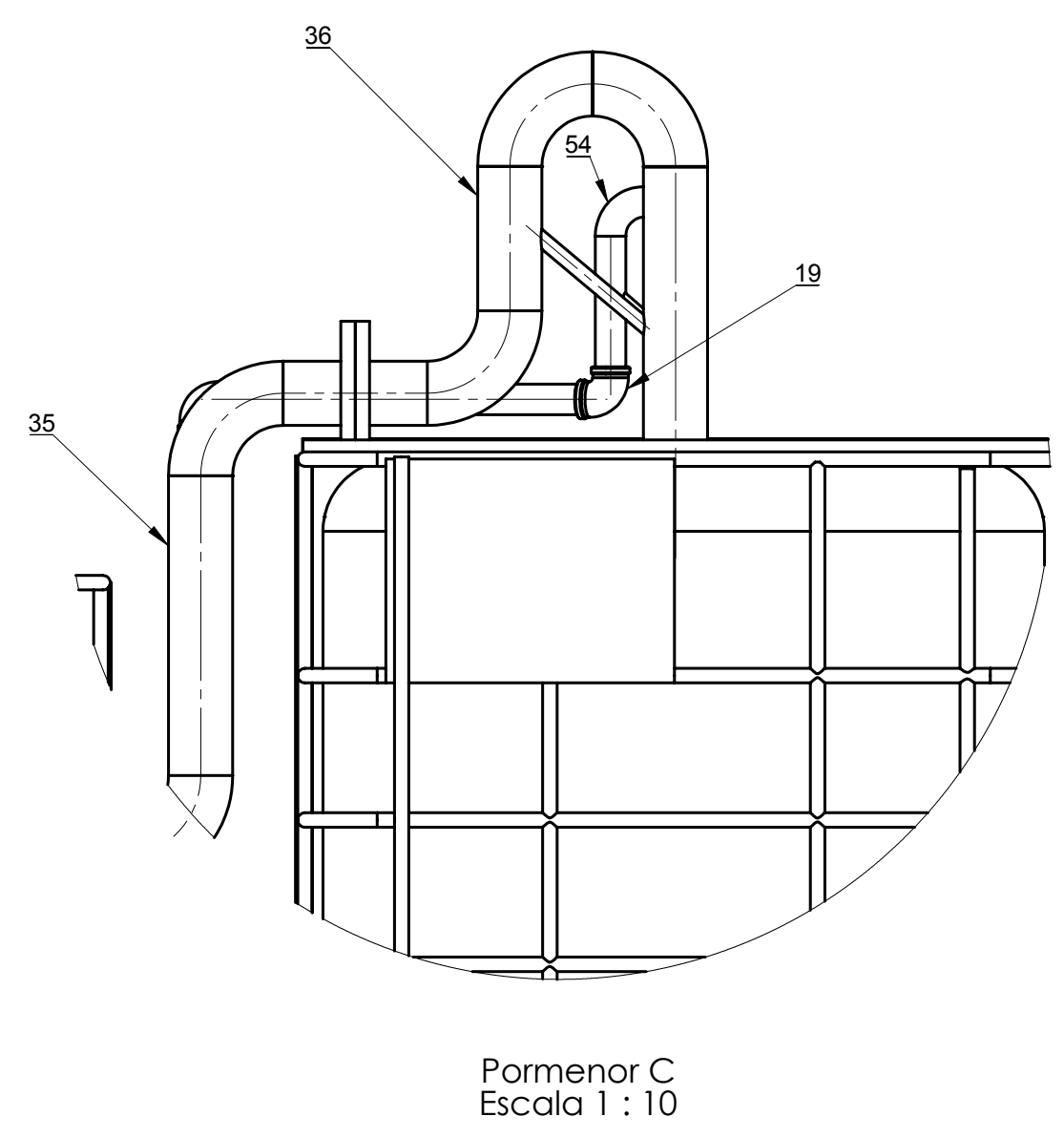
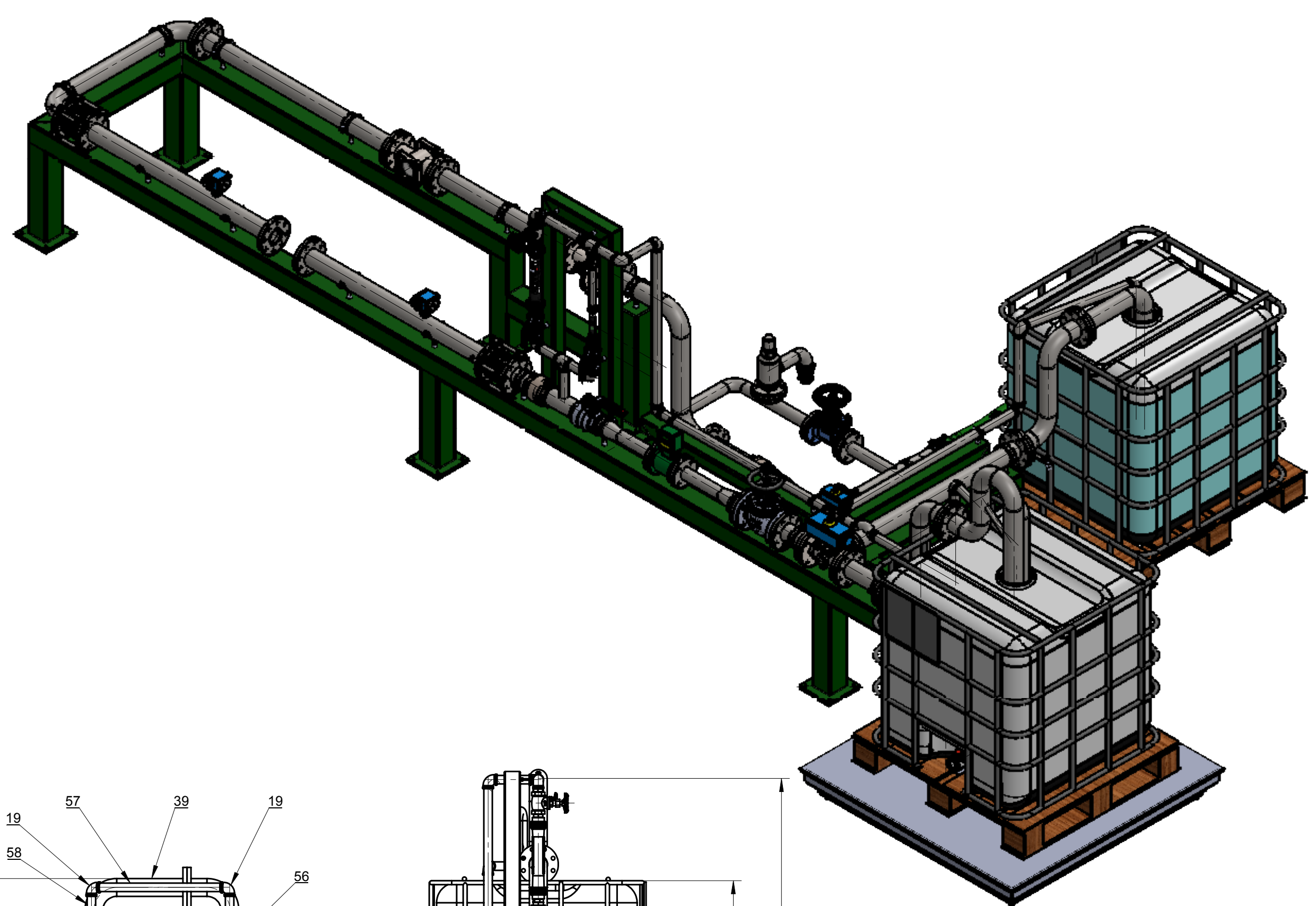
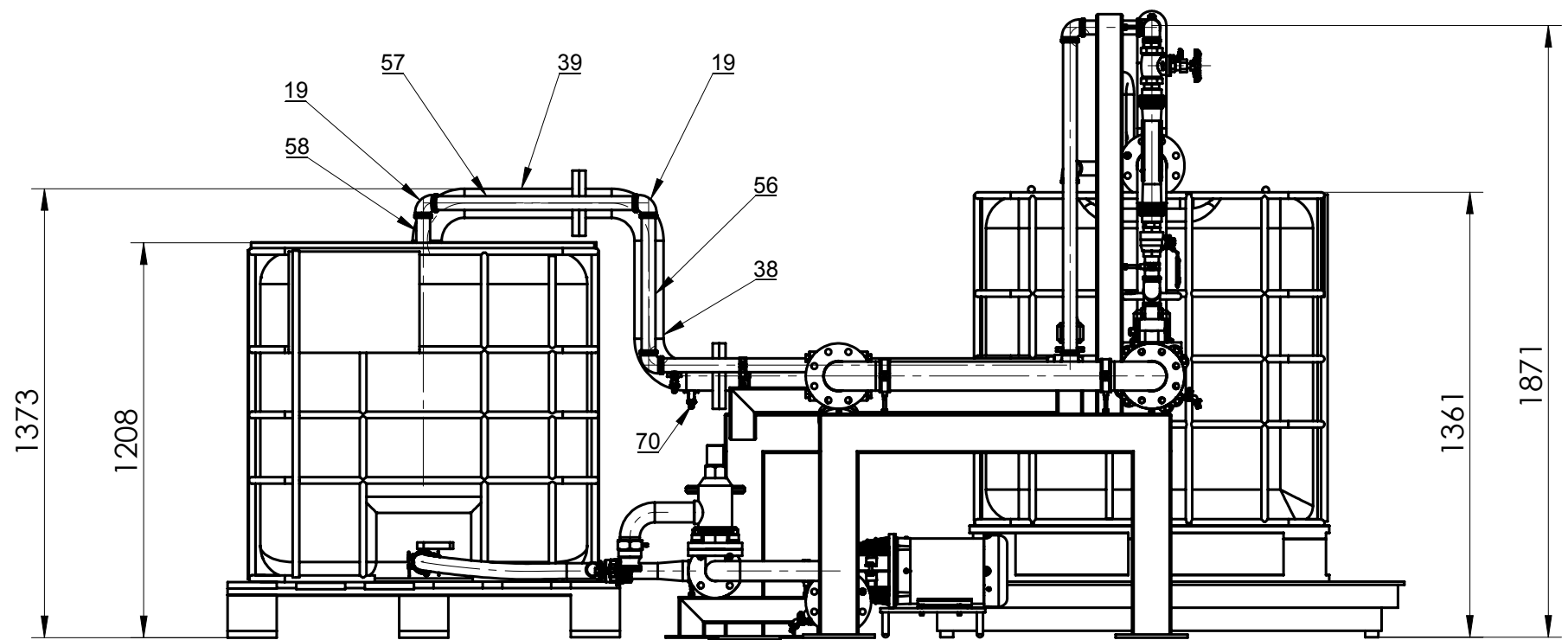


Peça T_8 80-1 (NºREF 60) pode ser substituído por:

- T_8 15-1
- T_8 20-1
- T_8 25-1
- T_8 32-1
- T_8 40-1
- T_8 50-1
- T_8 65-1

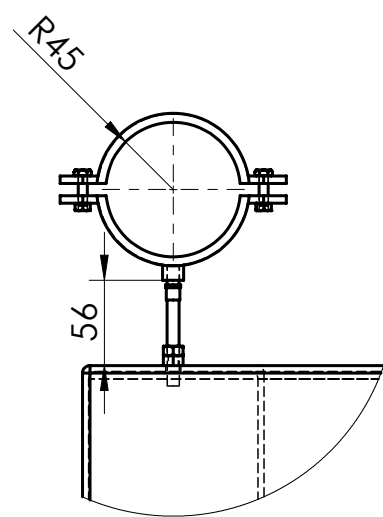
Peça T_8 80-1 (Nº REF 13) pode ser substituído por:

- T_8 15-2
- T_8 20-2
- T_8 25-2
- T_8 32-2
- T_8 40-2
- T_8 50-2
- T_8 65-2

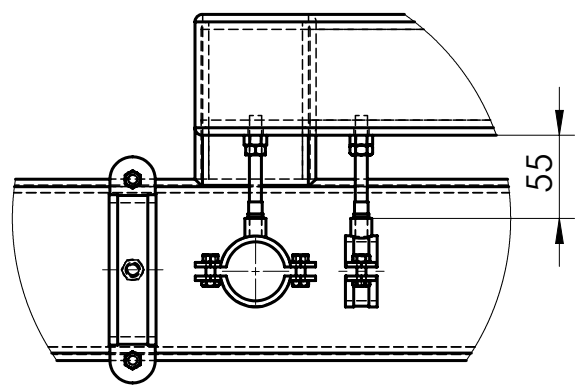


PROJ.	16-04-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018	Instituto Português
DES.	16-04-2018	Projeto Banco de	da Qualidade (IPQ)
VISTO		Ensaio	
Escala:	1:20	Conjunto Banco de	BE_0
1:10			
Toleran.	NP265	Ensaio	
Normal			

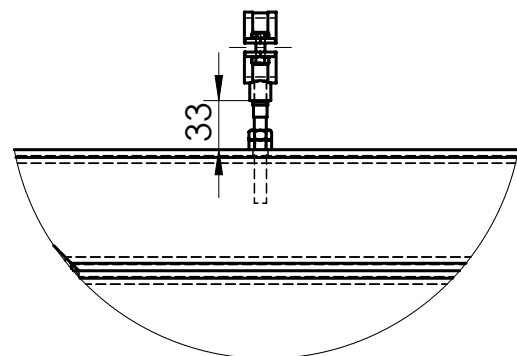
PROJ.			FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio			Instituto Português da Qualidade (IPQ)	
DES.							
VISTO							
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE - Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
1	Tubo 37	Ver T_11_1	AISI 304	57		1,78	Comprim: 650 (mm)
1	Tubo 38	Ver T_11_1	AISI 304	58		2,19	Comprim: 800 (mm)
1	Conjunto Estrutura	CE_1		59			
1	Tubo 8- DN 80 -1	T_8DN80 1	AISI 304	60		12,27	
1	Tubo 1 Asp	T_1_Asp	AISI 304	61		6,21	
1	União DIN - Asp	Anexo III Fig III.18		62			
1	ENGATE RÁPIDO 1POL TIPO A-100			63			
1	ENGATE RÁPIDO 1POL TIPO A-100 Plástico			64			
2	ENGATE RÁPIDO 1POL TIPO C-100			65			
1	Mangueira Flexível			66			
1	Conjunto Estrutura Asp	CEAsp_1		67			
2	Sensor de pressao			68			Adquirido
2	Flange	EN1092-1rosçada DIN25756 PN10	AISI 304	69		3,71	
5	conjunto torneira	Anexo III Fig III.16		70			
5	União simples FF DN10			71			
1	Globe-valve-DN50-PN16	Anexo III Fig III.5		72			Comprar
1	Válvula de segurança	Anexo III Fig III.11		73			Comprar
1	Tubo de válvula de segurança	T_VS		74		1,24	
1	ENGATE RÁPIDO 1POL TIPO A-100 - saída segurança			75			
1	Filtro y	Anexo III Fig III.6		76			Comprar
1	Tubo 5.2	T_5.2	AISI 304	77		16,25	
1	Visor	Anexo III Fig III.13		78			Comprar



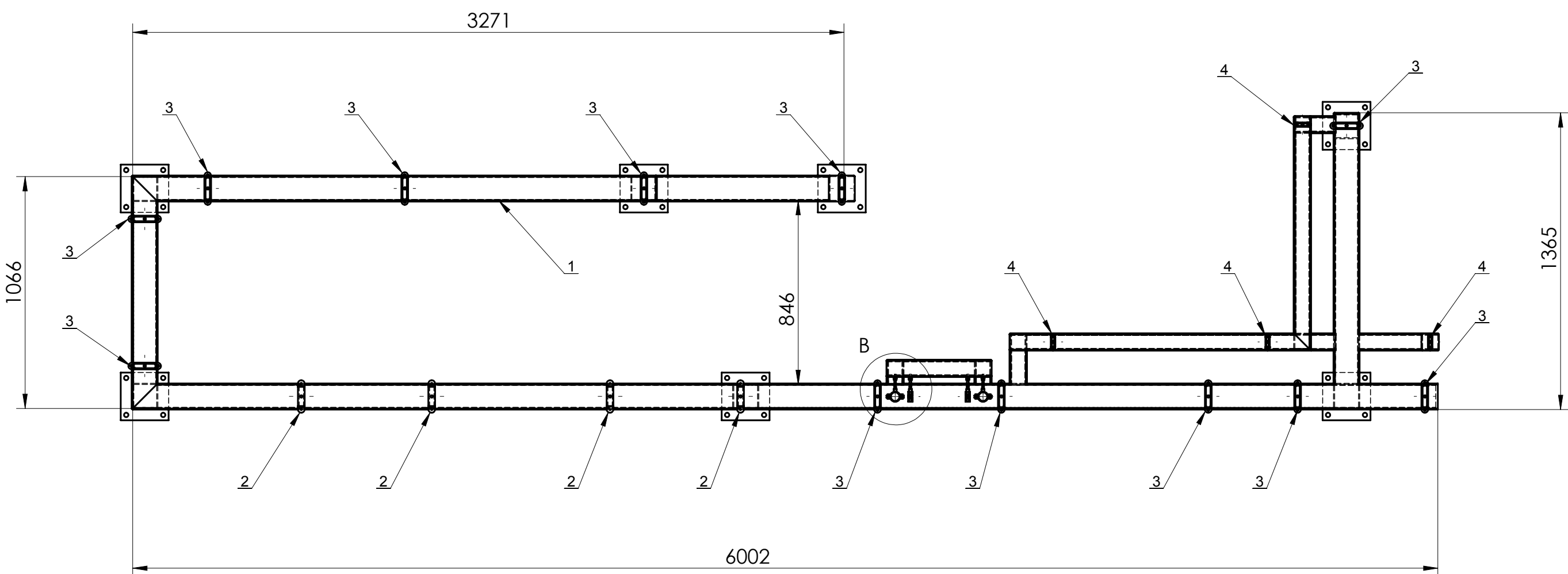
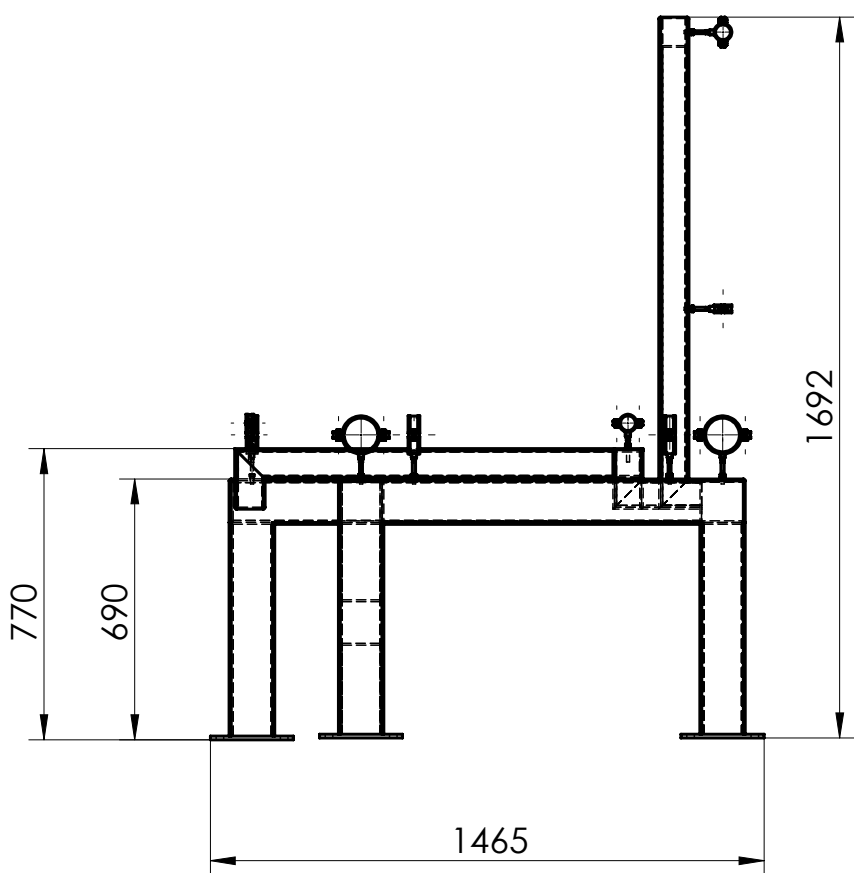
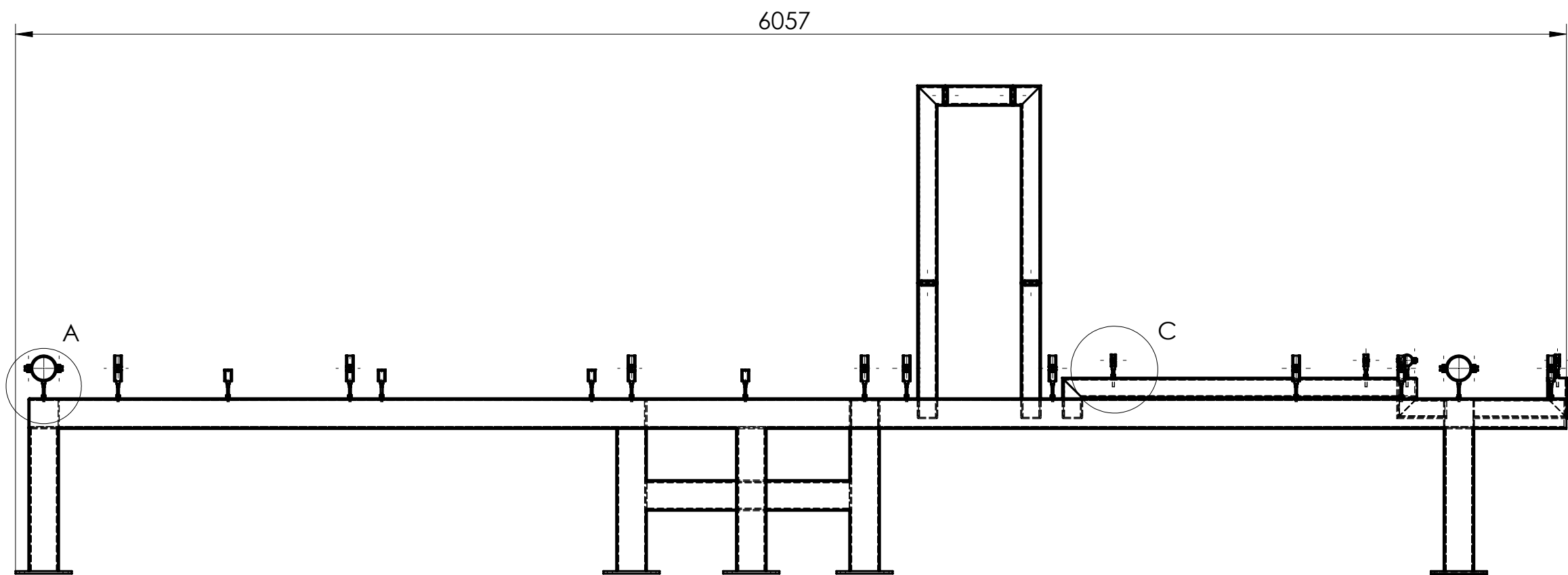
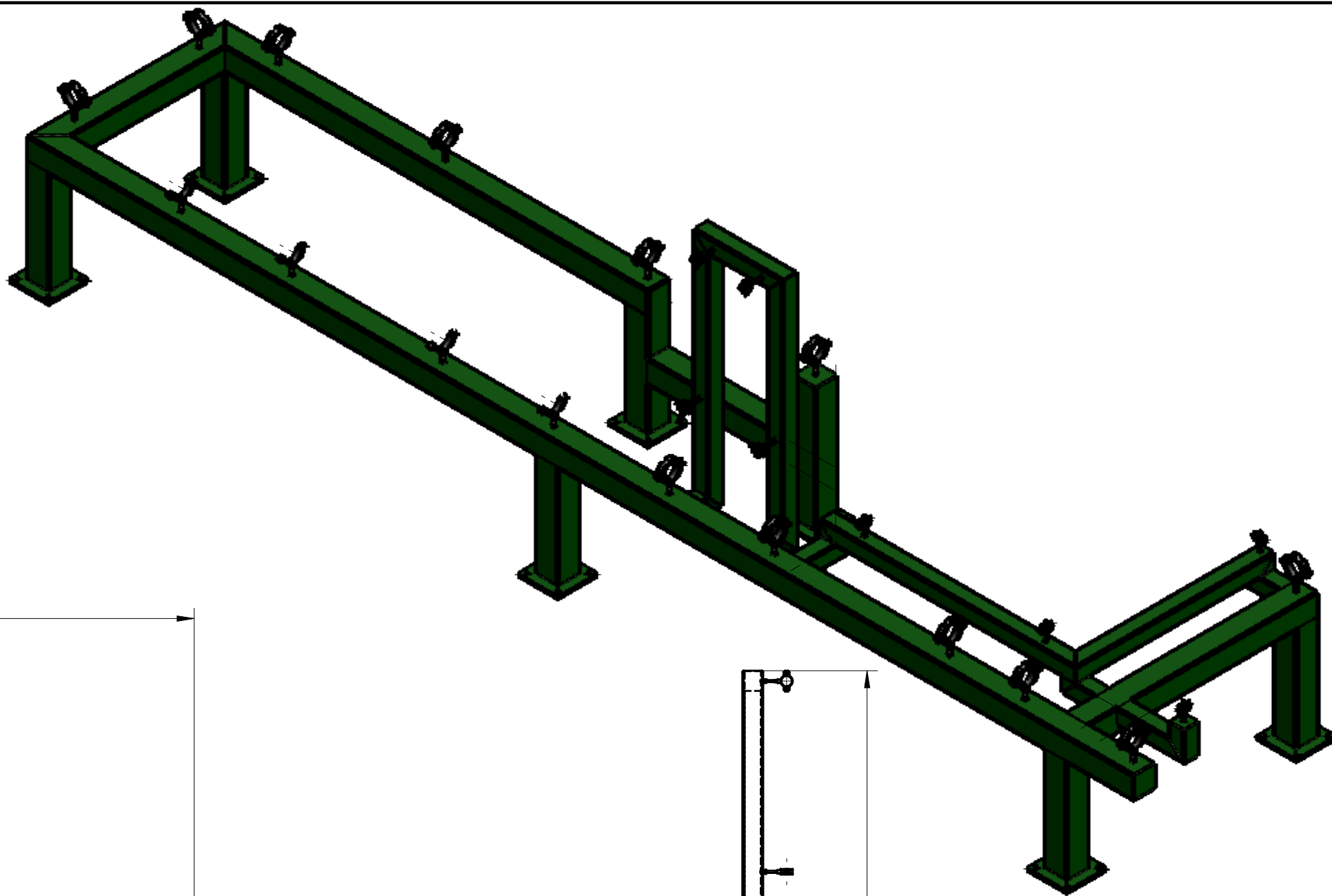
Pormenor A
Escala 1 : 5



Pormenor B
Escala 1 : 5



Pormenor C
Escala 1 : 5



N10
Geral

NOTA: A diferença entre o Conjunto Abraçadeira DN32 e DN32.1 é a distância roscada no perno

4	Conjunto Abraçadeira DN32.1	Figura III.25		5			
4	Conjunto Abraçadeira DN32	Figura III.25		4			
12	Conjunto Abraçadeira DN80	Figura III.25		3			
4	Conjunto Abraçadeira DN80-6 zona ensaio	Figura III.25		2			
1	Estrutura	E_1	1.0570 (S355J2G3)	1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE	Nº DA MATRIZ	PESO OBSERVAÇÕES

PROJ.
DES.
VISTO

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português da
Qualidade (IPQ)

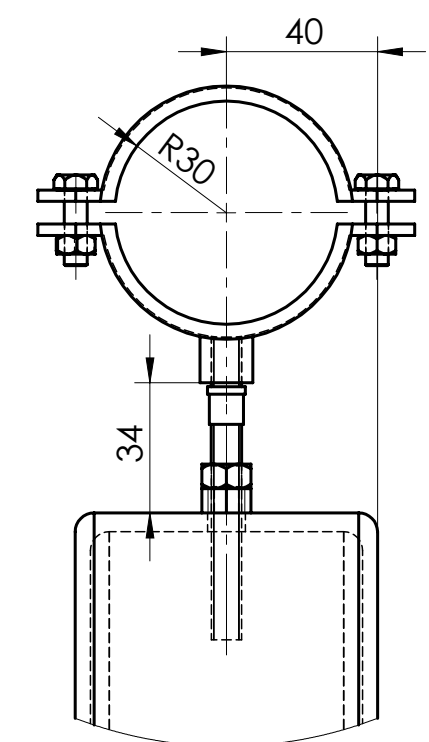
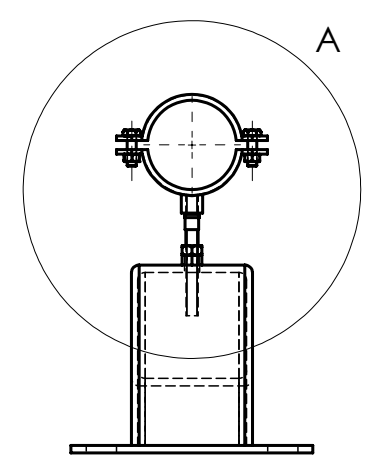
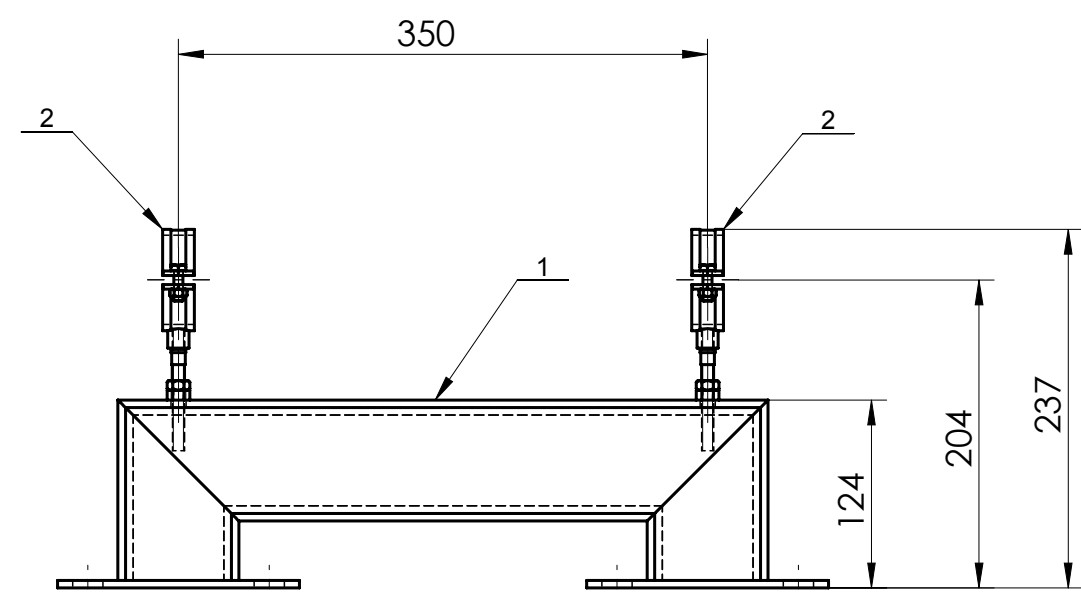
Escala:
1:20

Toleran.
NP265
Normal

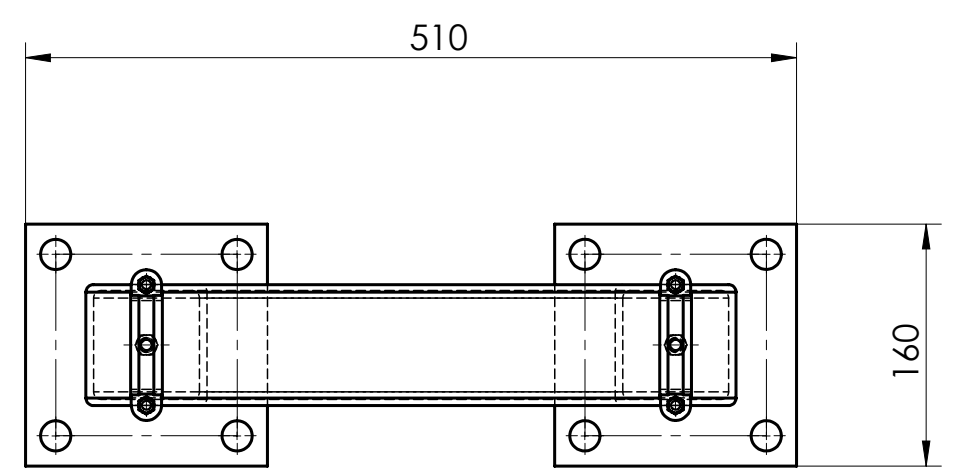
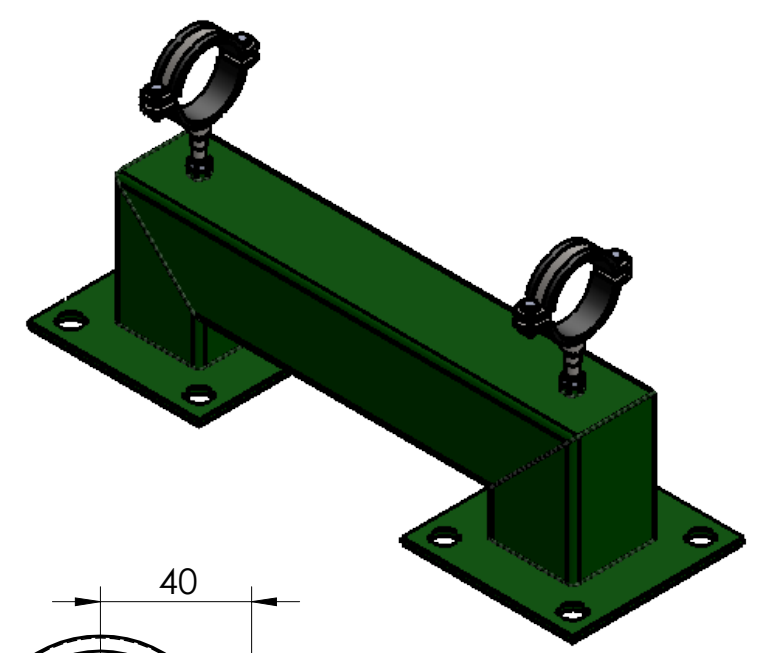
Conjunto Estrutura

CE_1

	PROJ.		24-03-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio			Instituto Português da Qualidade (IPQ)			
	DES.		24-03-2018							
	VISTO									
	Escala:	Estrutura						E_1		
	1:20									
	1:10									
	1:5									
	1:1									
	Toleran.									
	NP265									
	Normal									



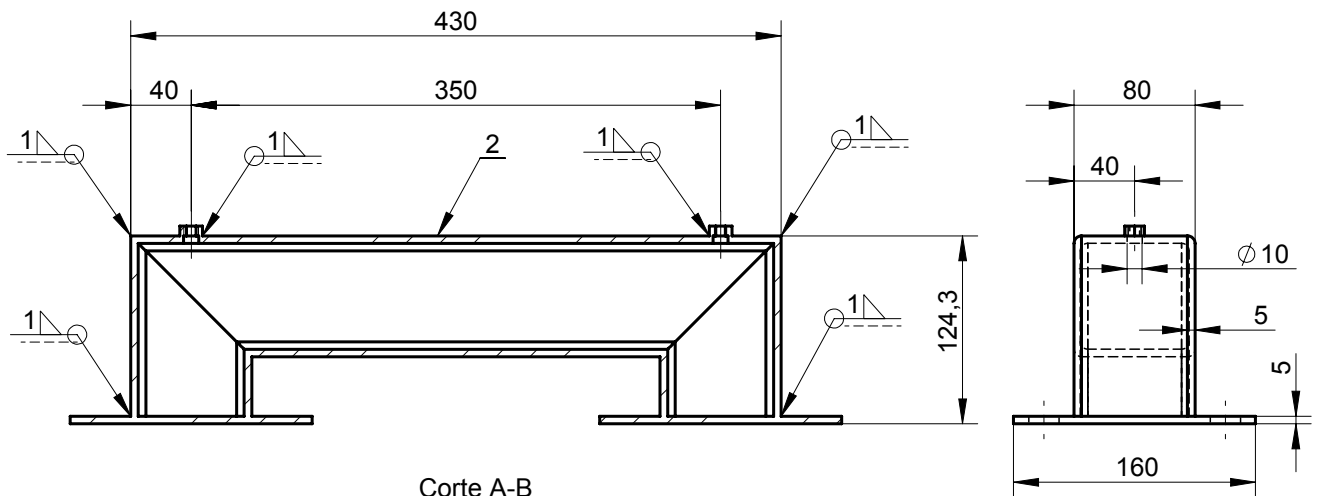
Pormenor A
Escala 1 : 2



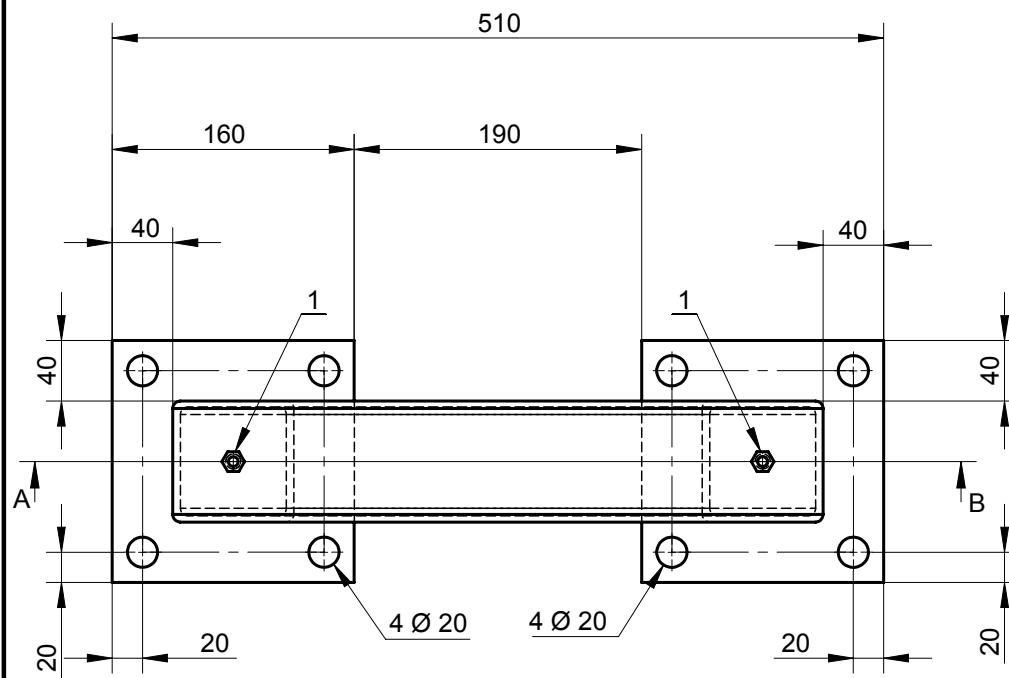
2	Conjunto Abraçadeira DN50	Figura III.25	2			
1	Estrutura Asp	Est Asp	1		7298.83	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO

		PROJ.	24-03-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
		DES.	24-03-2018		
		VISTO			
		Escala:	Conjunto Estrutura Asp		CEAsp_1
		1:5 1:2			
		Toleran.			
		NP265 Normal			

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



Corte A-B
Escala 1 : 5



N10 Geral

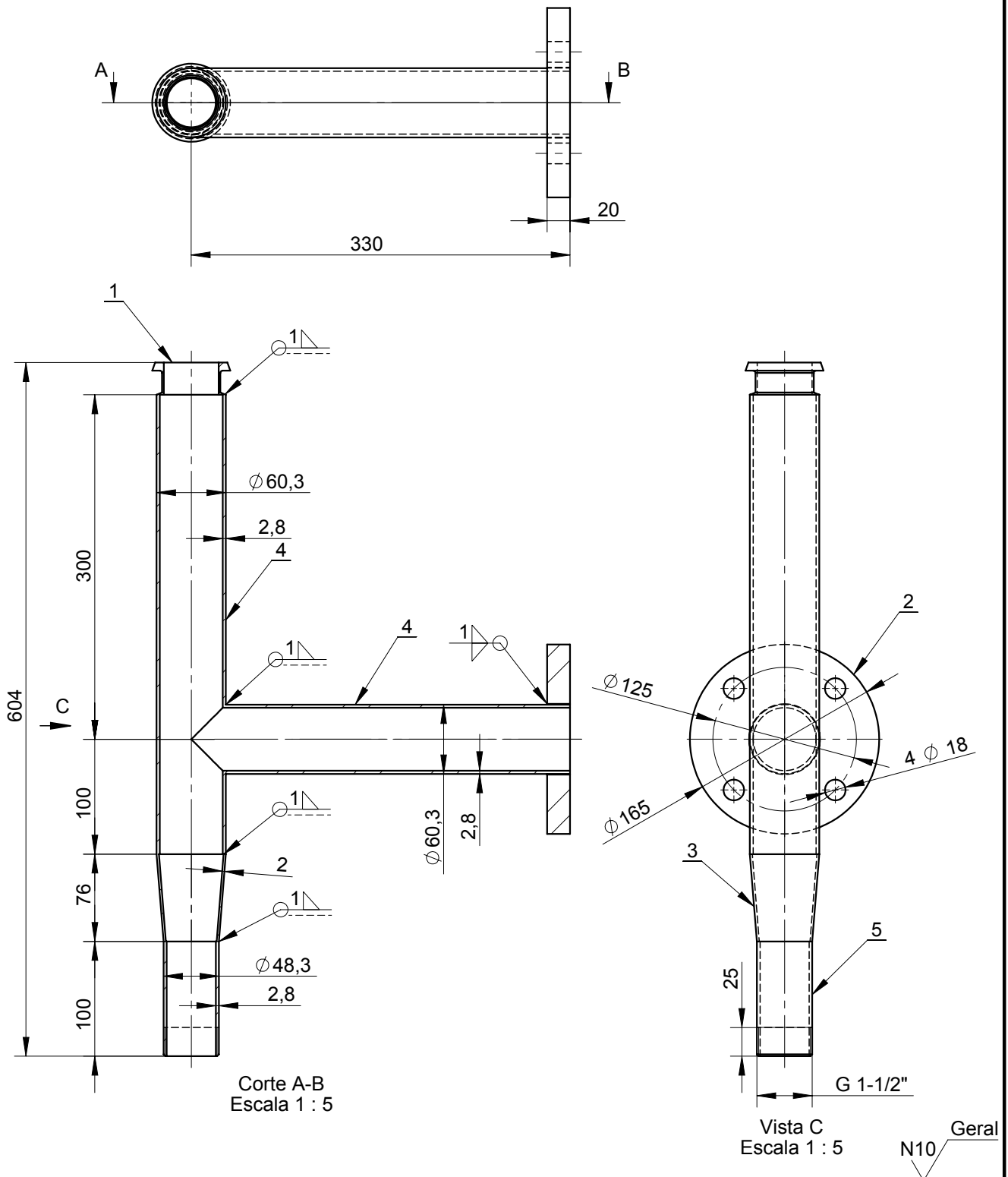
1	Tubo estrutural quadrado	EN10210-1	S355 J2 H	2			
2	Porca sextavada M8	DIN934	AISI304	1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Estrutura Asp	Est Asp			
	NP265						
	Normal						

PROJ.	28-05-2018
DES.	28-05-2018
VISTO	

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

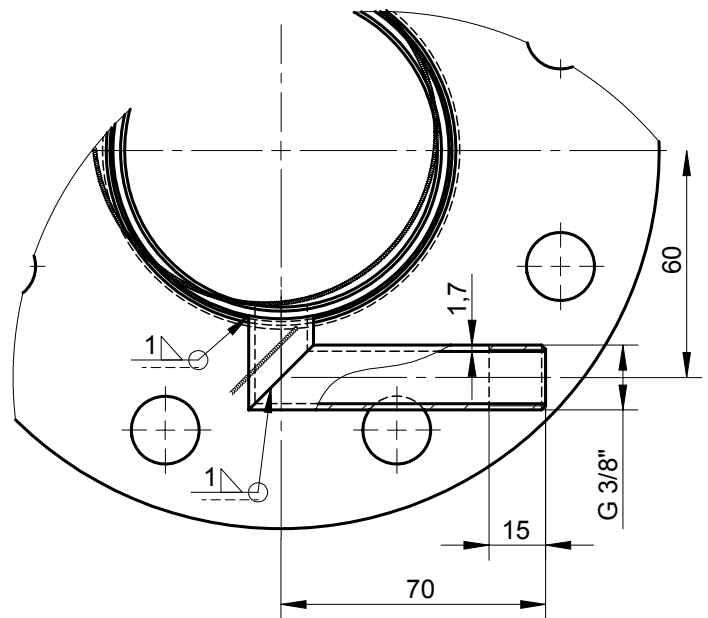
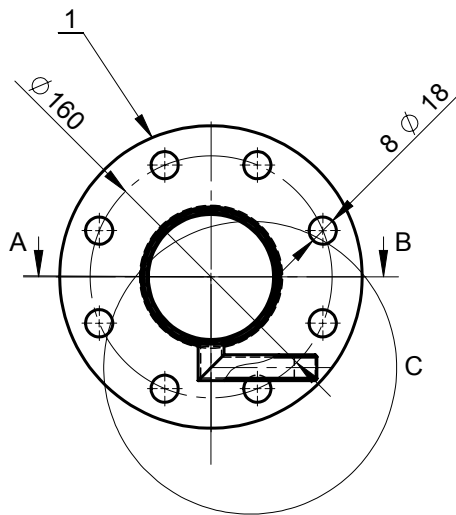
Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



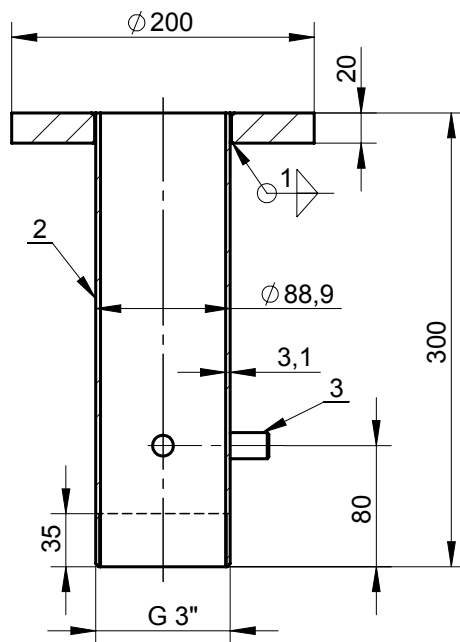
1	Tubo sem costura 1-1/2"	ASTM	AISI 304	5	Schedule 10S		
2	Tubo sem costura 2"	ASTM	AISI 304	4	Schedule 10S		
1	Redução concêntrica DN 50x40	ISO	AISI 304L	3		0,2	
1	Flange Plana EN1092 DN50	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	2		2,73	
1	União DIN	DIN11851	AISI 304	1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 1 Asp	T_1_Asp
	NP265 Normal			

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



Pormenor C
Escala 1 : 2



Corte A-B
Escala 1 : 5

N10 ^{Geral}

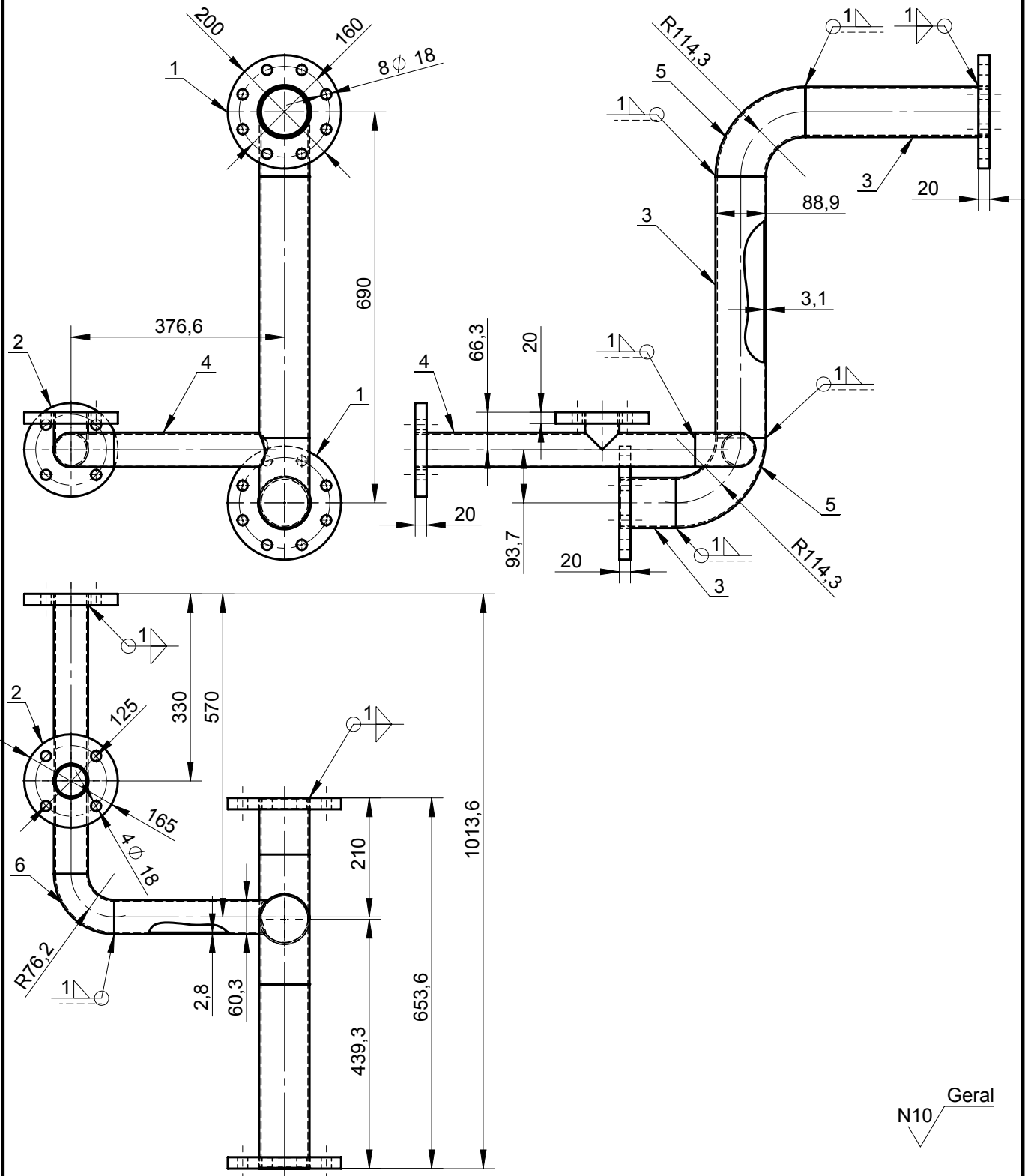
1	Tubo sem costura 3/8"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	Peso	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 2	T_2
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018
DES.		28-05-2018
VISTO		

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

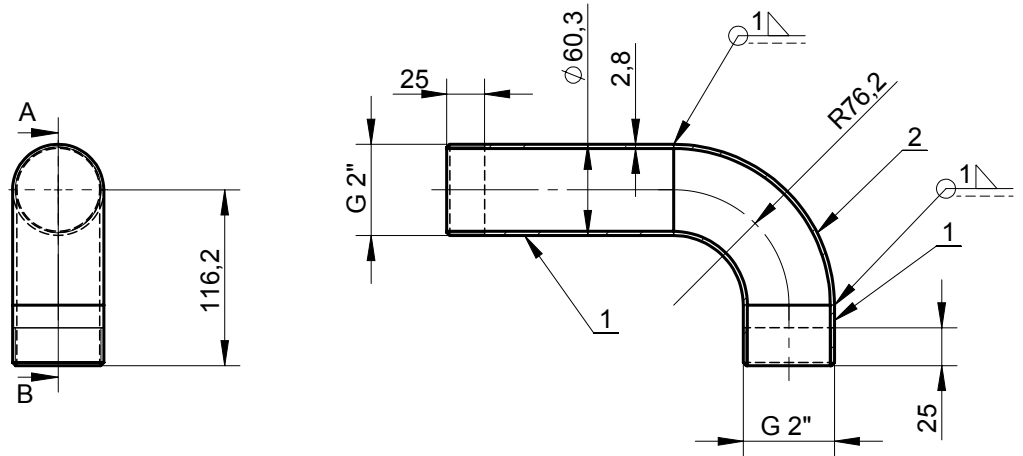
Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



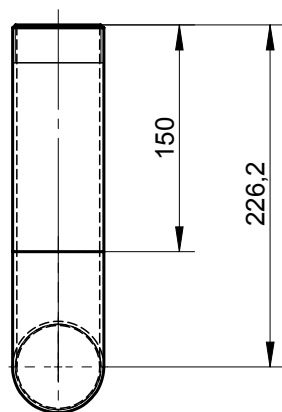
1	Curva 90° Raio Longo sem costura 2"	ASTM	AISI 304L	6	Schedule 10S	0,48	
2	Curva 90° Raio Longo sem costura 3"	ASTM	AISI 304L	5	Schedule 10S	1,14	
2	Tubo sem costura 2"	ASTM	AISI 304	4	Schedule 10S		
3	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
2	Flange Plana EN1092 DN50	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	2		2,73	
2	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:10	For Instructional Use Only	Tubo 3	T_3
	NP265 Normal			

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



Corte A-B
Escala 1:5

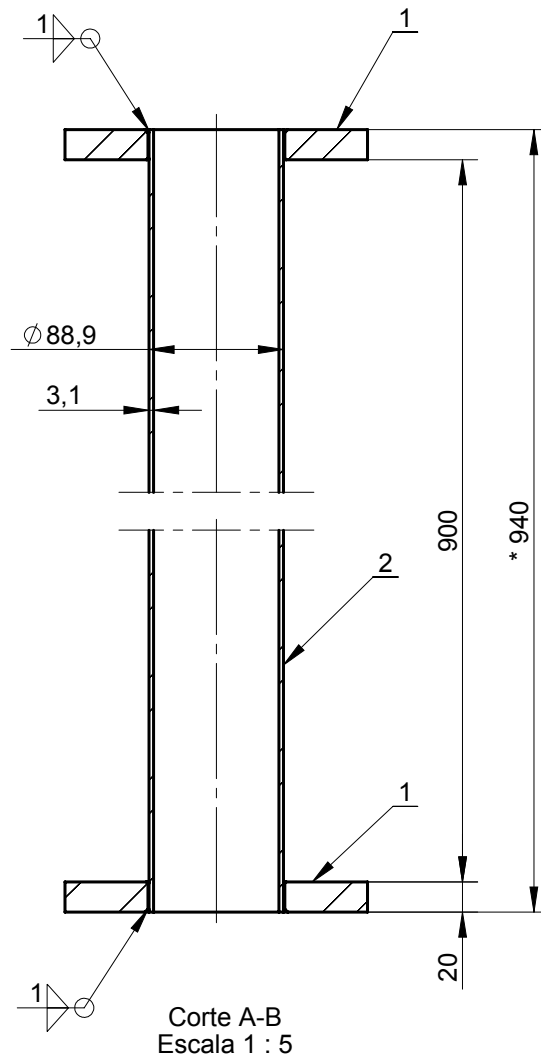
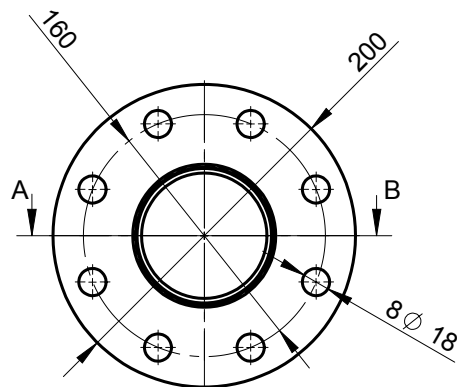


N10 ^{Geral}

1	Curva 90° Raio Longo sem costura 3"	ASTM	AISI 304L	2	Schedule 10S	1,14	
2	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	1	Schedule 10S		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition. For Instructional Use Only.	1:5	Tubo de valvula de segurança	T_VS
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



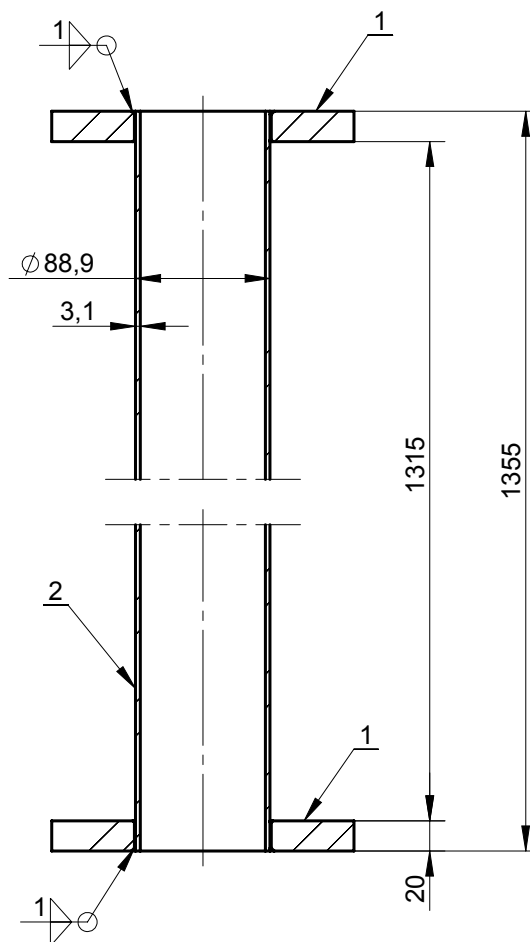
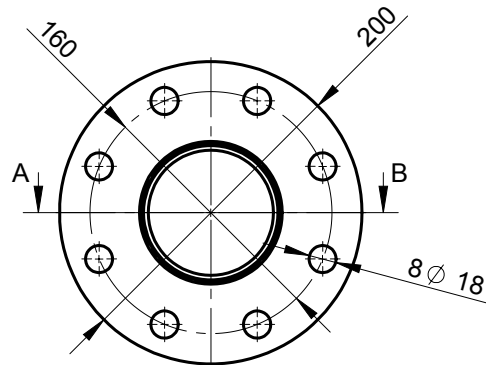
Nota: Cota com * sujeita a alterações. Ver comprimento da peça a produzir na lista de peças - observações

N10 Geral

1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
2	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 5	T_5
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



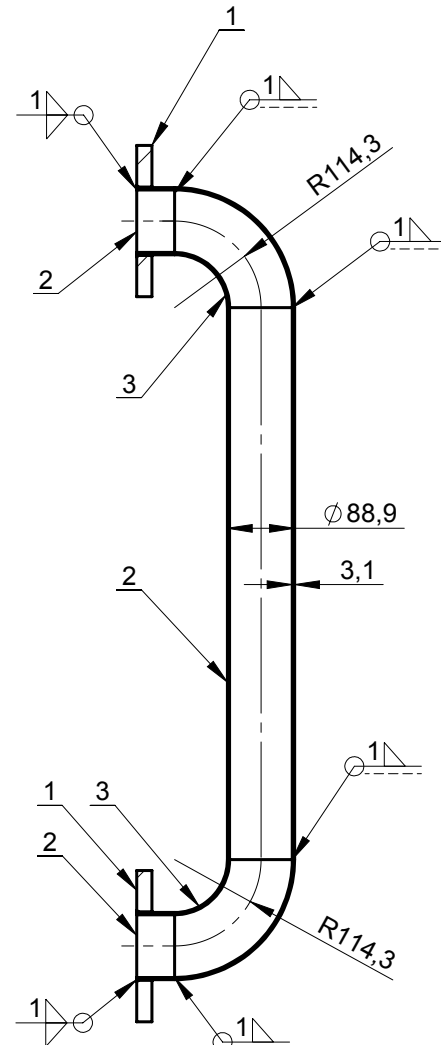
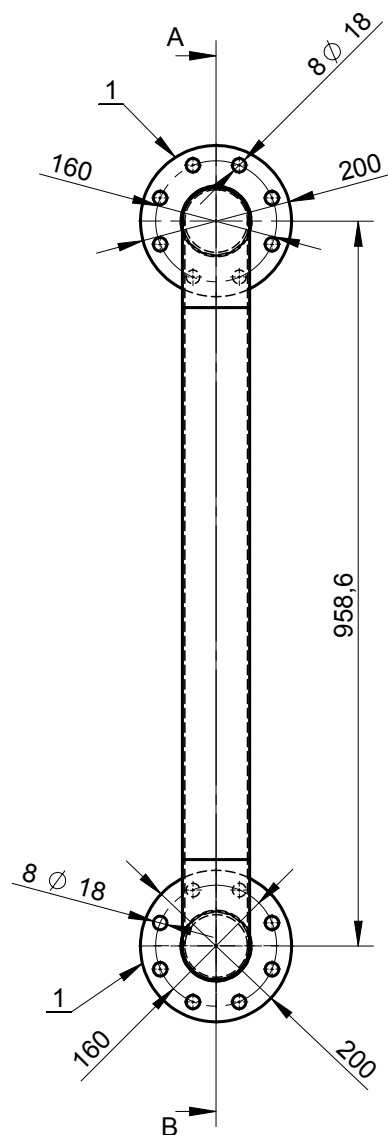
Corte A-B
Escala 1 : 5

N10 Geral

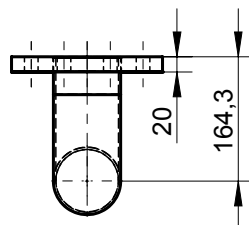
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
2	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 5.2	T_5.2
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



Corte A-B
Escala 1 : 10

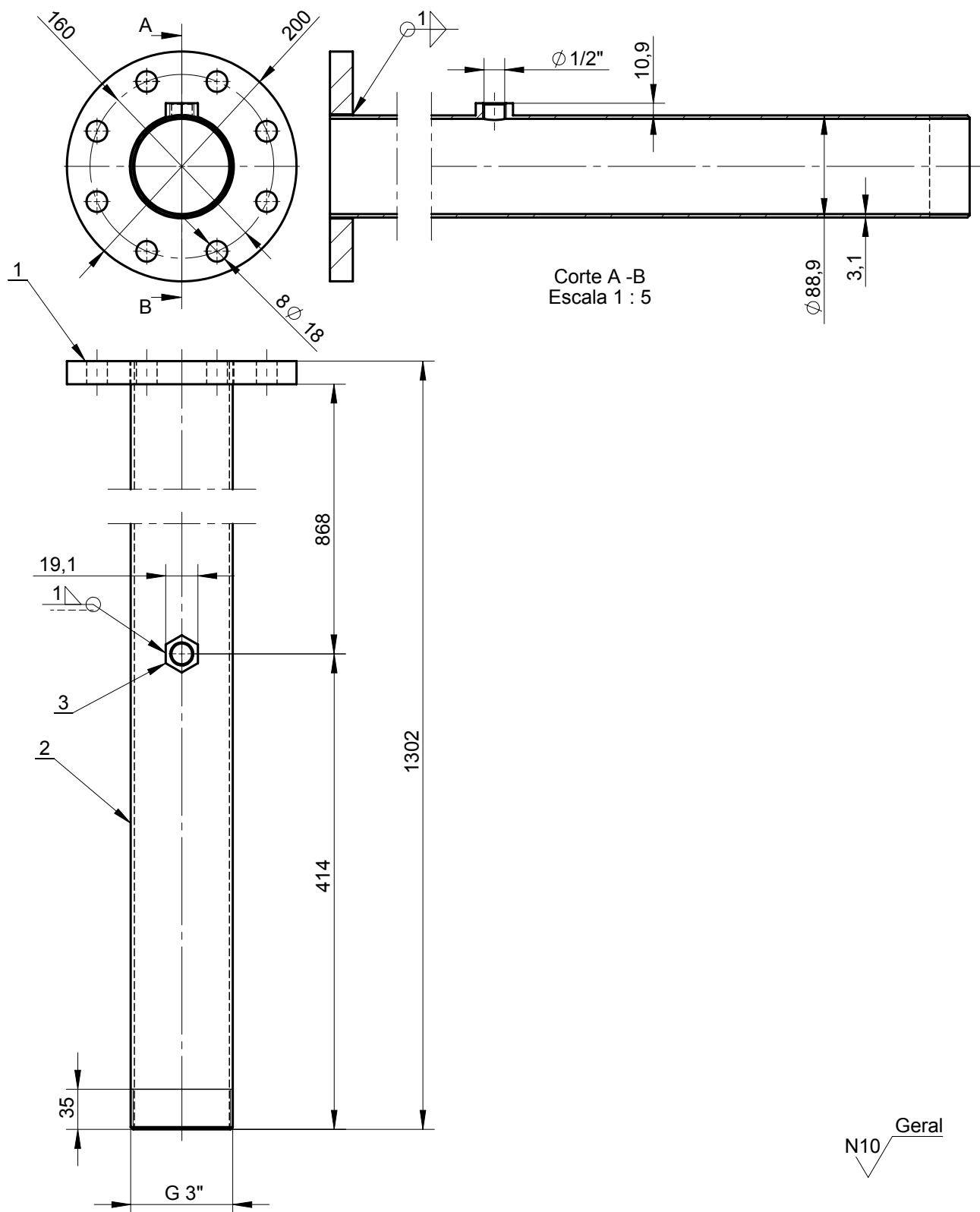


N10 Geral

1	Curva 90° Raio longo sem costura 3"	ASTM	AISI 304L	3	Schedule 10S	1,14	
3	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN 80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:10	Tubo 7	T_7
	For Instructional Use Only		
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



N10 Geral

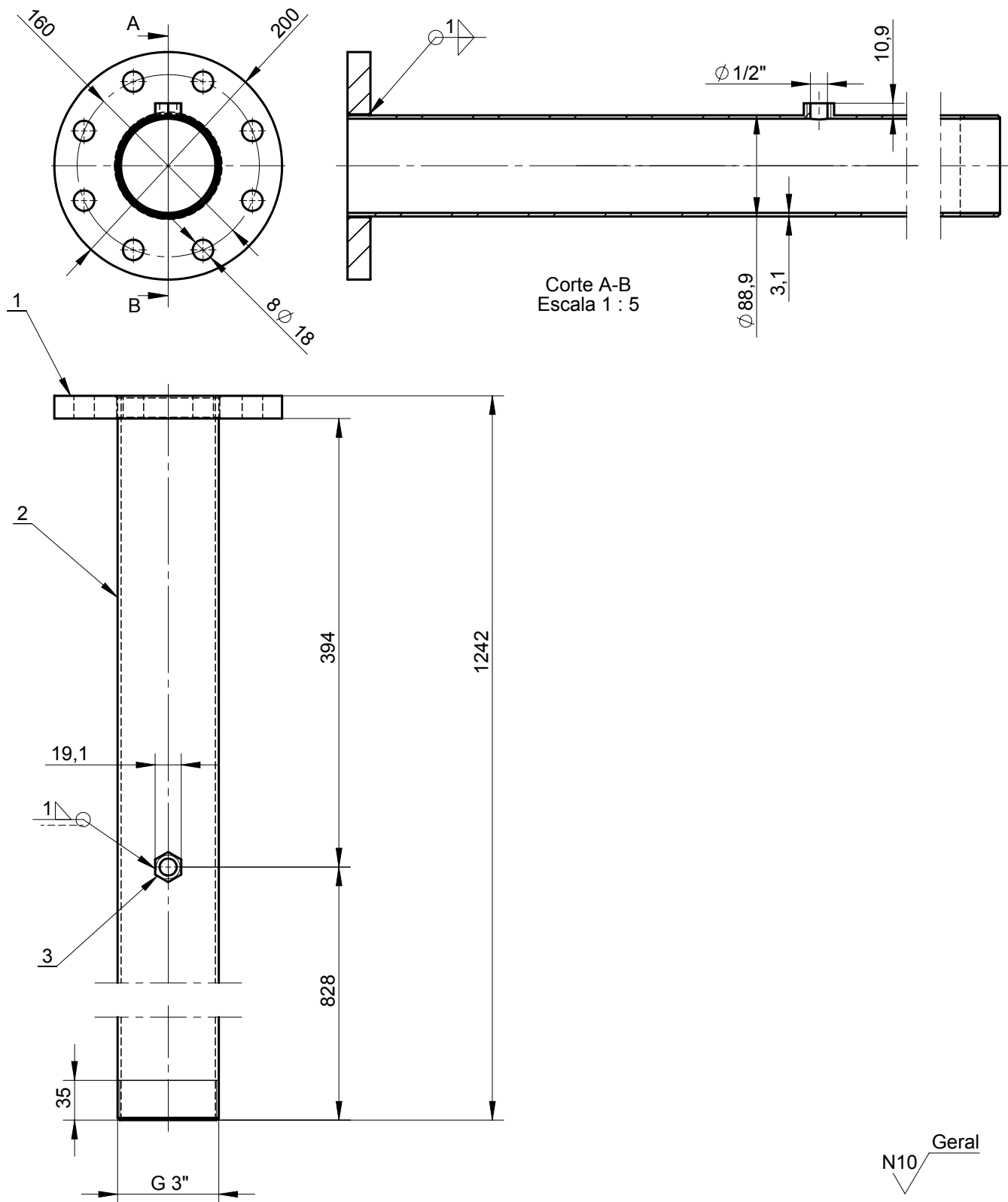
1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	3			
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 80 -1	T_8DN80 1			
	NP265						
	Normal						

PROJ.		28-05-2018
DES.		28-05-2018
VISTO		

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português
da Qualidade (IPQ)

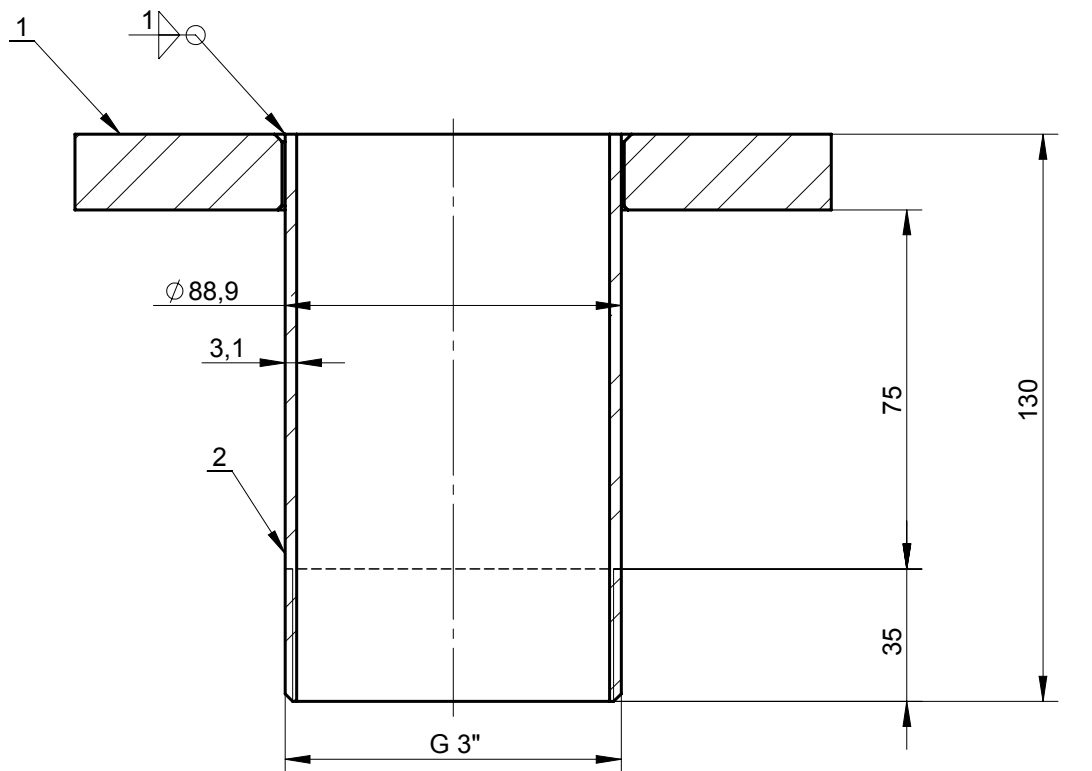
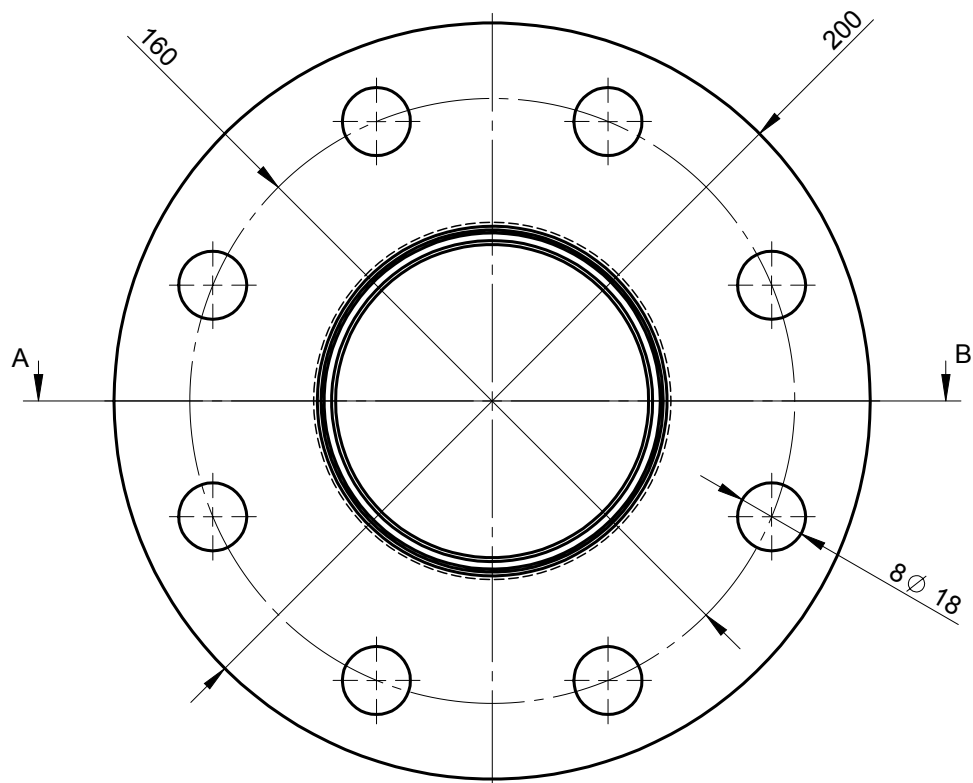


N10 Geral

1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	3			
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 80 -2	T_8DN80 2
	NP265 Normal			

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



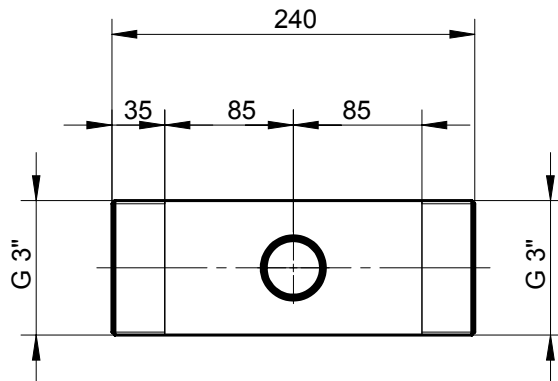
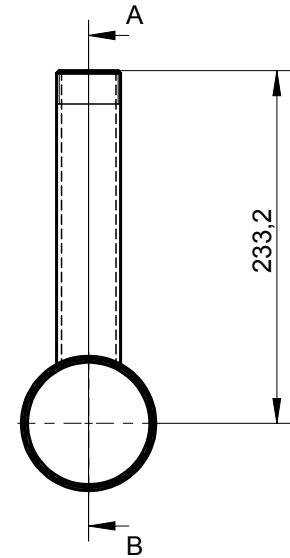
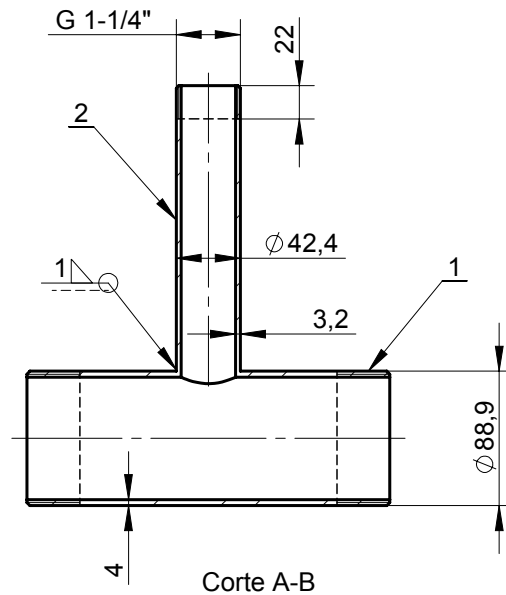
Corte A-B
Escala 1 : 2

N10 Geral

1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
2	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 9	T_9
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				

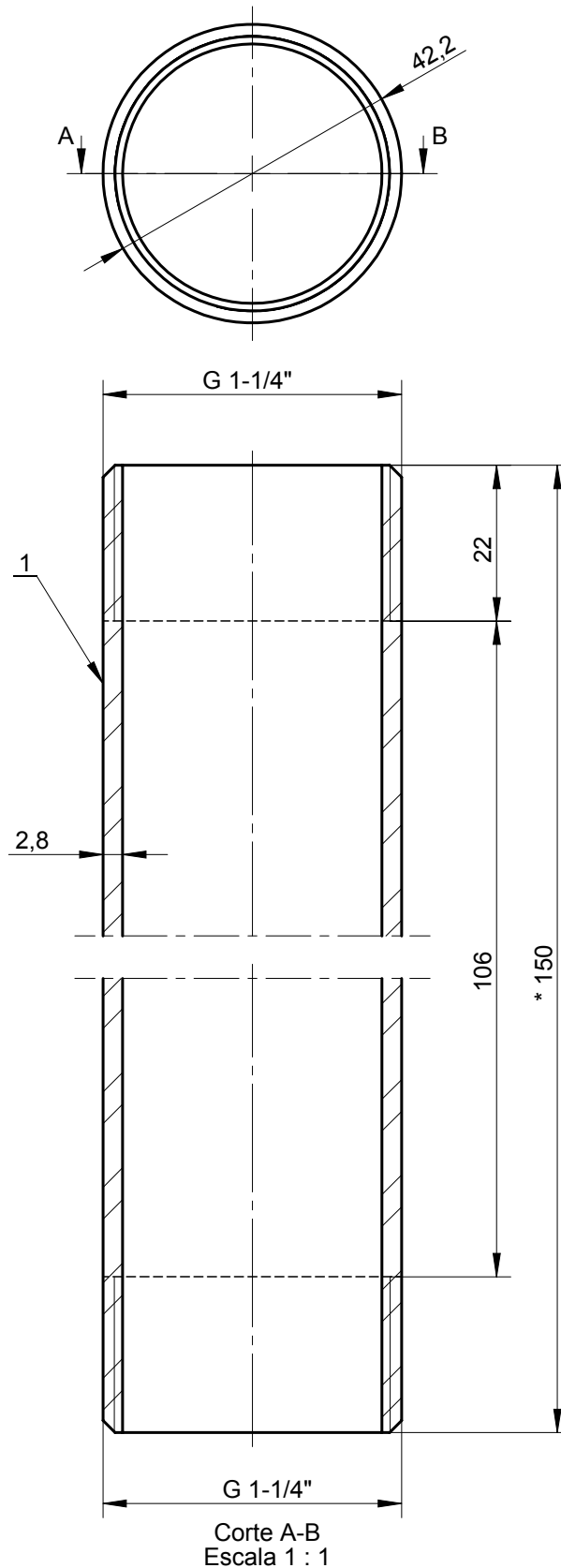


N10 Geral

1	Tubo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	1	Schedule 10S		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 10	T_10
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



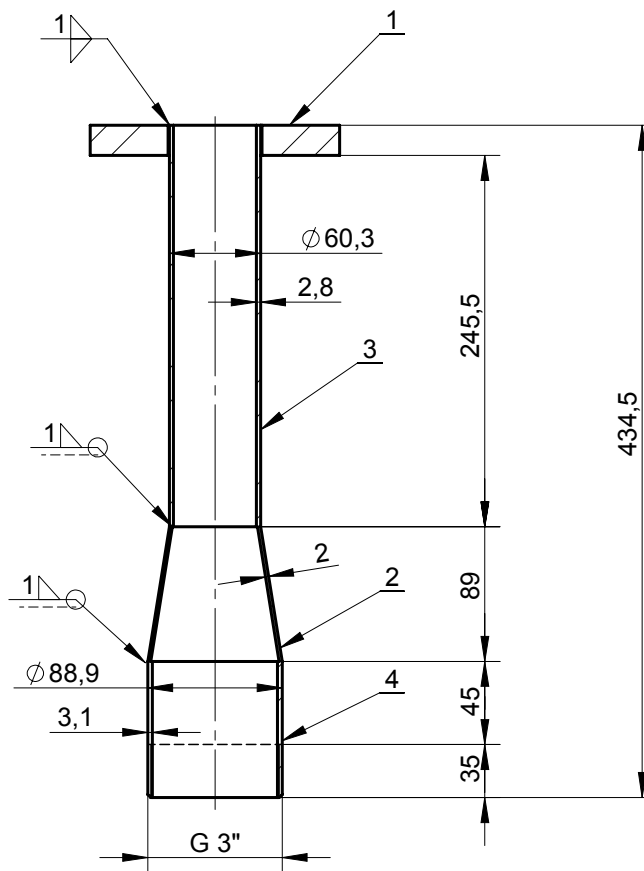
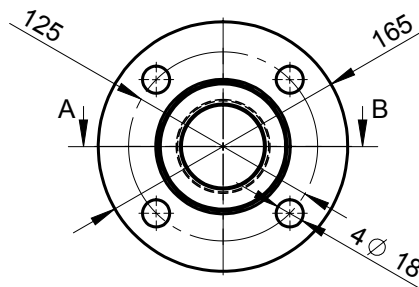
Nota: Cota com *
sujeita a alterações. Ver
comprimento da peça a
produzir na lista de
peças - observações

N10 ^{Geral}

1	Tubo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304	1	Schedule 10S		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:1	For Instructional Use Only	Tubo 11-1	T_11_1			
	NP265 Normal						

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



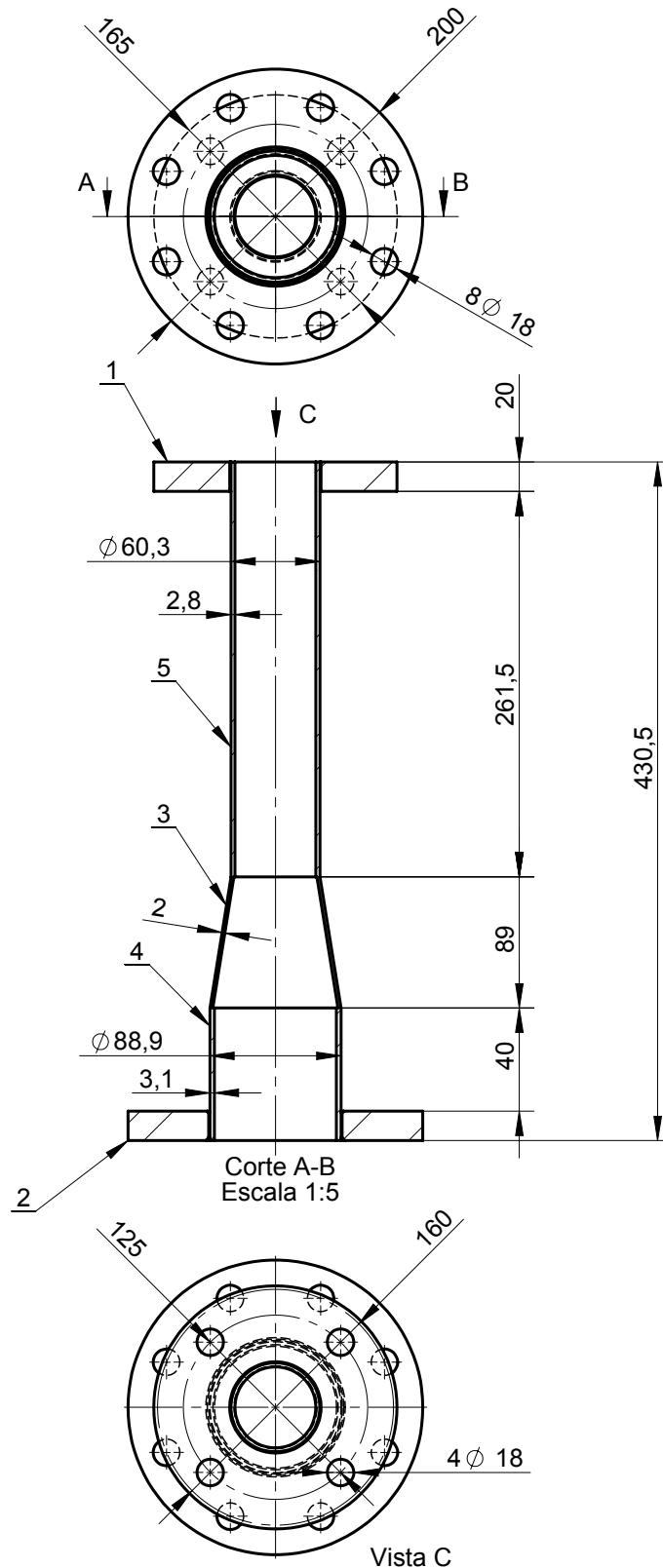
Corte A-B
Escala 1:5

N10 ^{Geral}

1	Tubo sem costura 2"	ASTM	AISI 304	4	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	2		0,3	
1	Flange Plana EN1092 DN50	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		2,73	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 15	T_15
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				

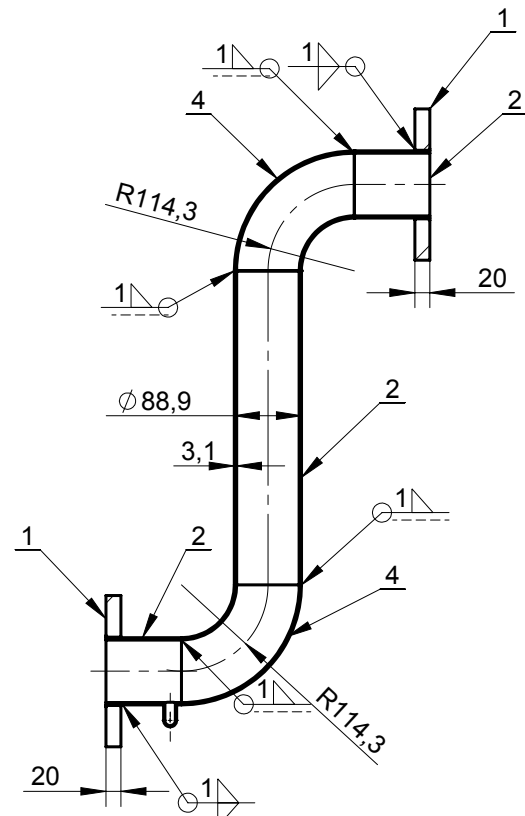
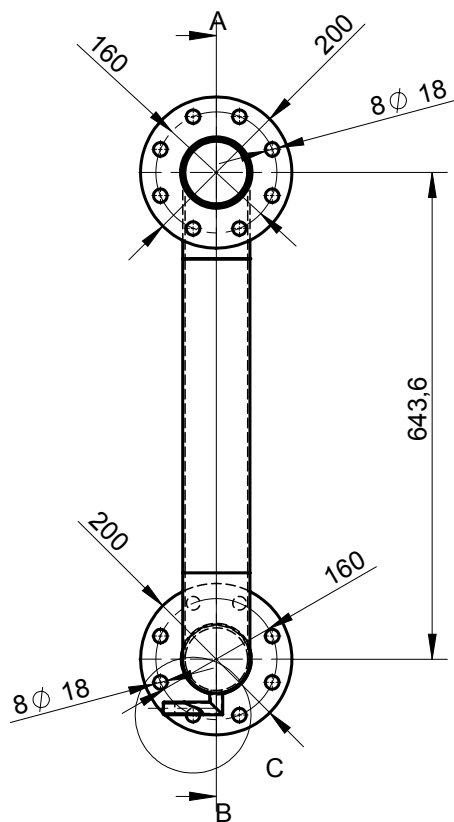


N10 **Geral**

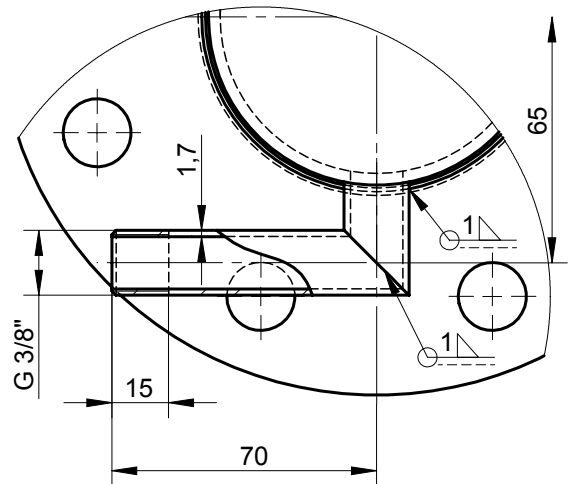
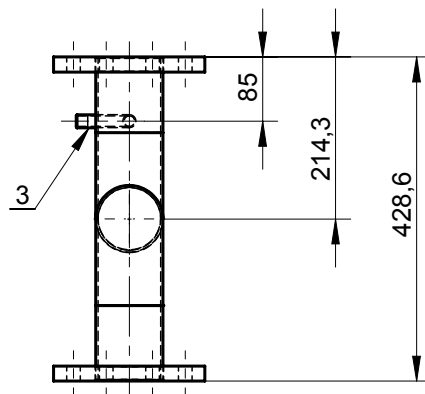
1	Tubo sem costura 2"	ASTM	AISI 304	5	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	4	Schedule 10S		
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	3		0,3	
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	2		3,6	
1	Flange Plana EN1092 DN50	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		2,73	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 16	T_16
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



Corte A-B



Pormenor C
Escala 1 : 2

N10 Geral

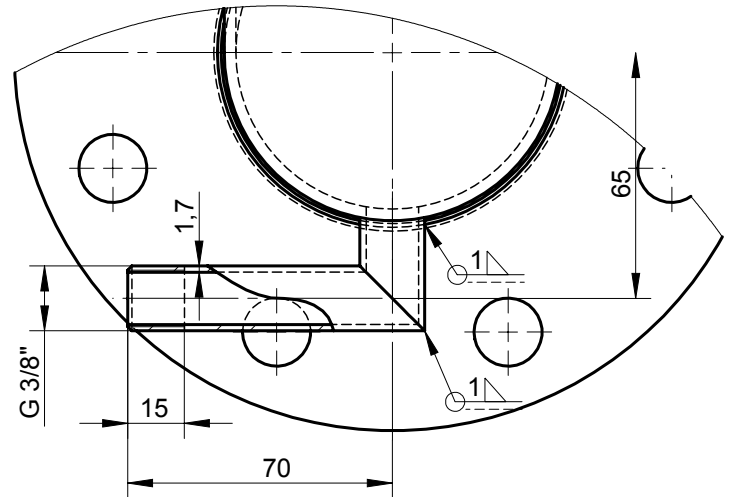
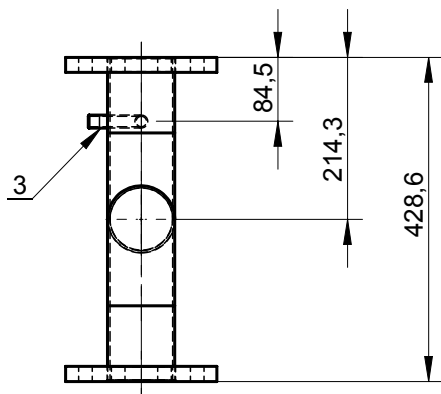
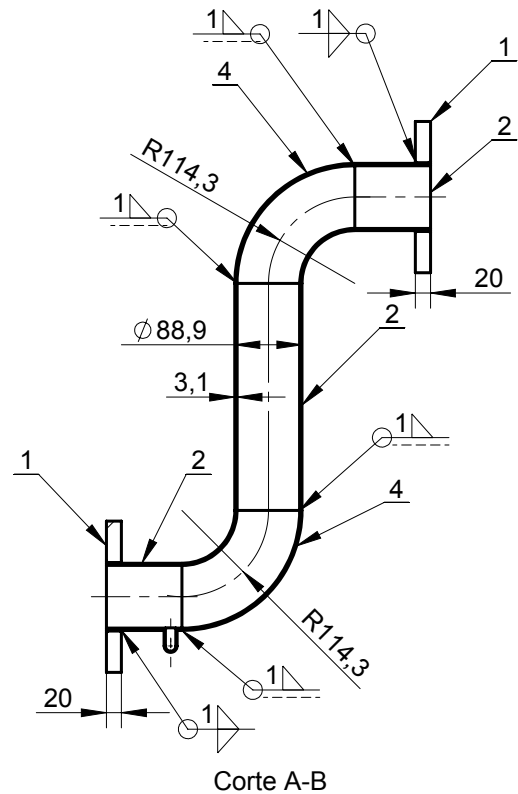
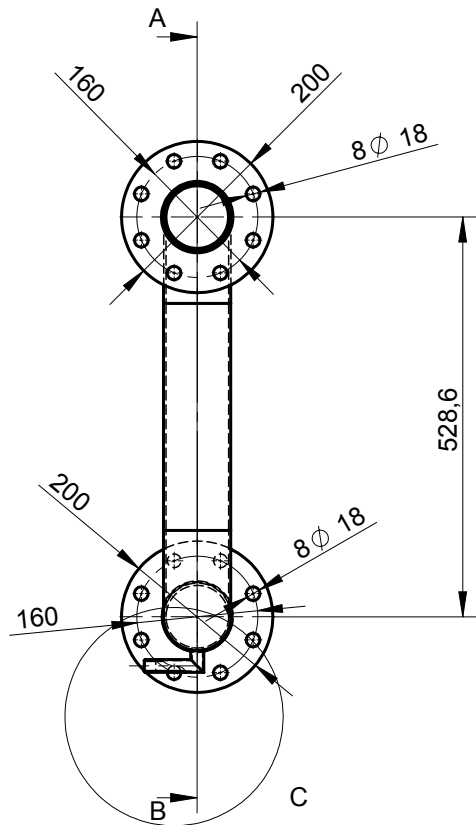
2	Curva 90° Raio Longo sem costura 3"	ASTM	AISI 304L	4	Schedule 10S	1,14	
1	Tubo sem costura 3/8"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
3	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
2	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:10	Tubo 19	T_19
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018
DES.		28-05-2018
VISTO		

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



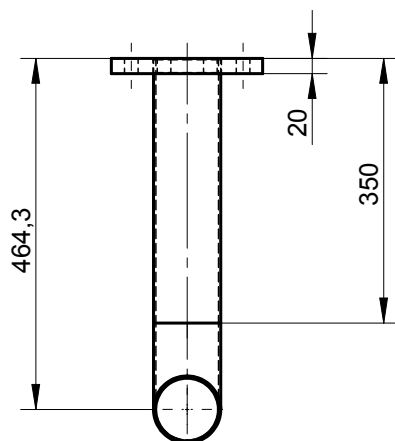
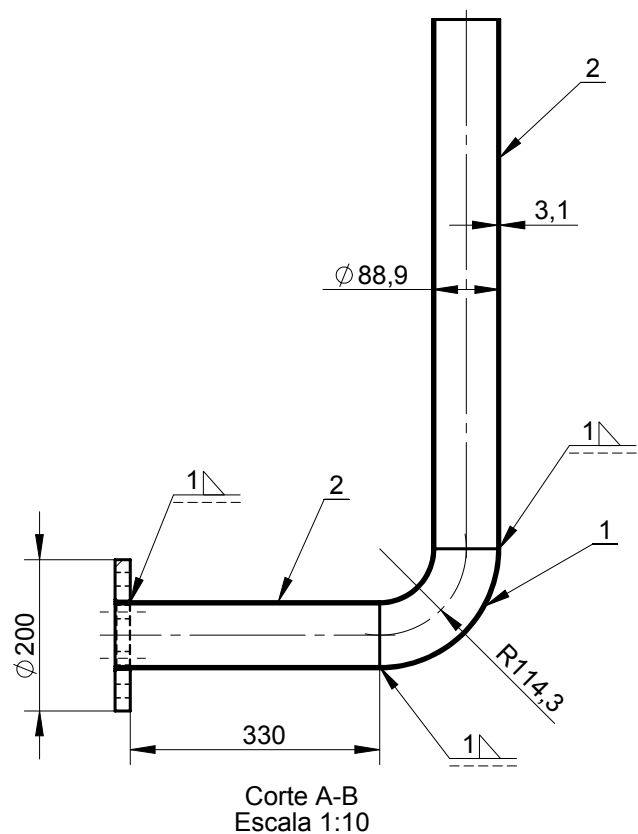
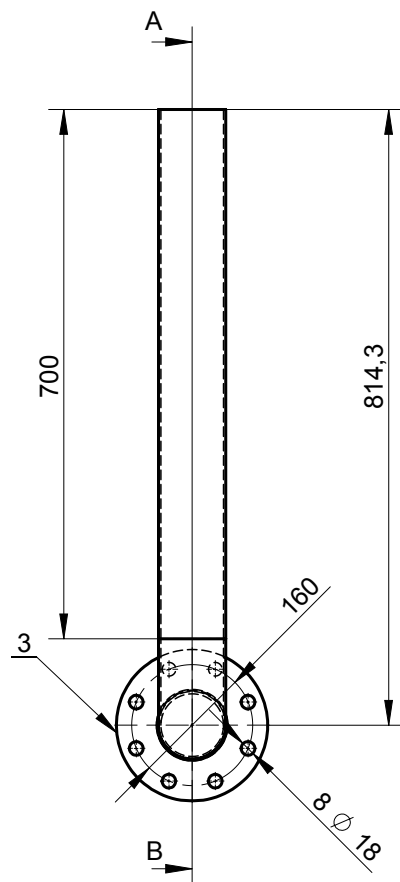
Pormenor C
Escala 1 : 2

N10 Geral

2	Curva 90° Raio Longo sem costura 3"	ASTM	AISI 304L	4	Schedule 10S	1,14	
1	Tubo sem costura 3/8"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
3	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
2	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:10 Tolerância NP265 Normal	For Instructional Use Only	Tubo 22	T_22
--------------------------------	---------------------------------------	----------------------------	---------	------

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				

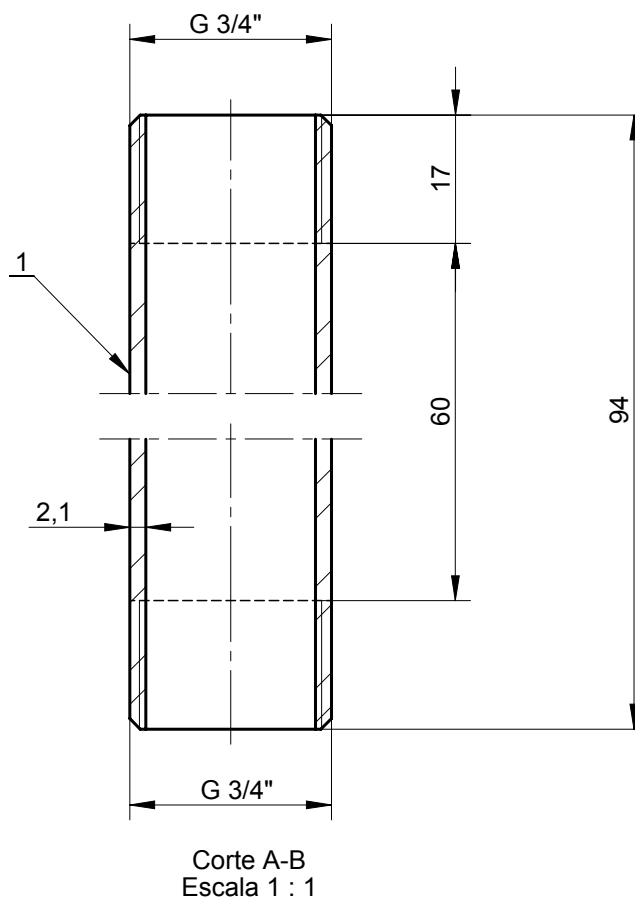
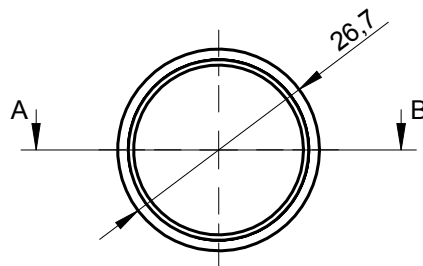


N10 ^{Geral}

1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	3		3,6	
2	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Curva 90° Raio Longo sem costura 3"	ASTM	AISI 304L	1	Schedule 10S	1,14	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:10	Tubo 23	T_23
	NP265 Normal		

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				

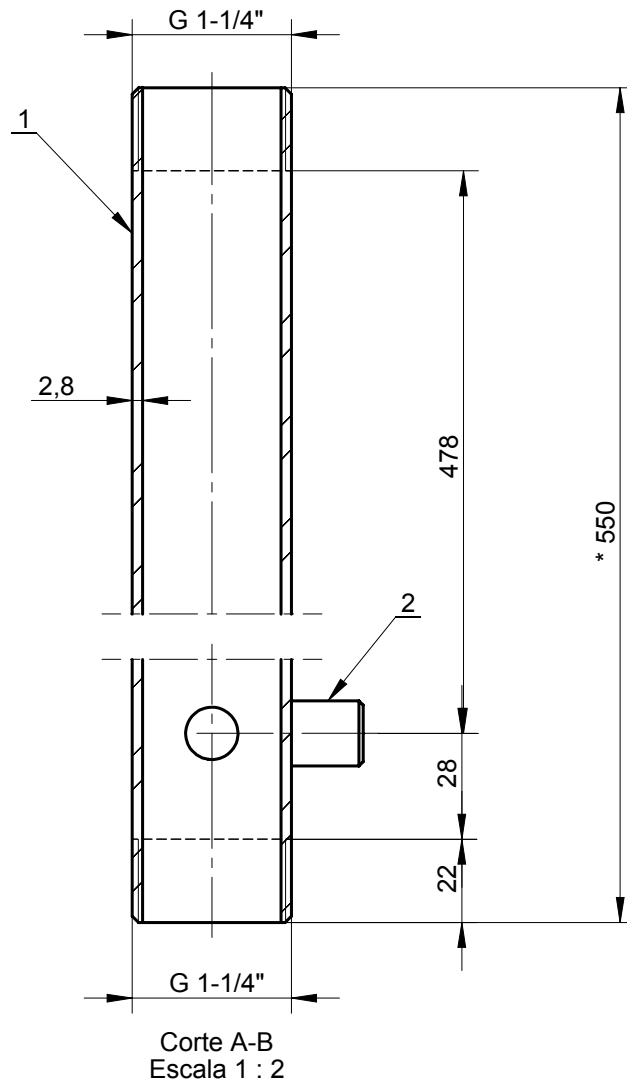
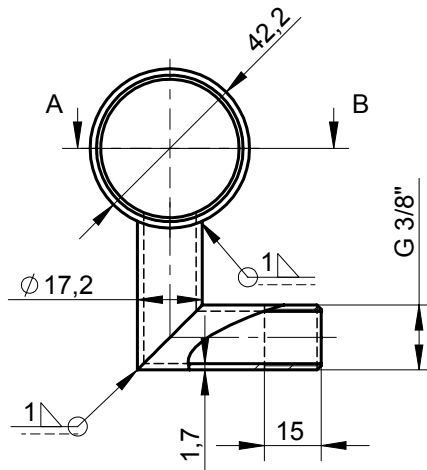


N10 ^{Geral}

1	Tubo sem costura 3/4"	ASTM	AISI 304	1	Schedule 10S		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:1	For Instructional Use Only	Tubo 24	T_24			
	NP265 Normal						

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				



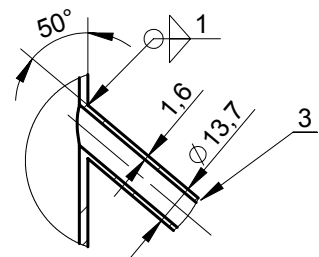
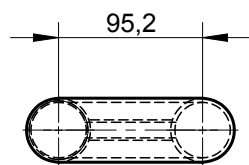
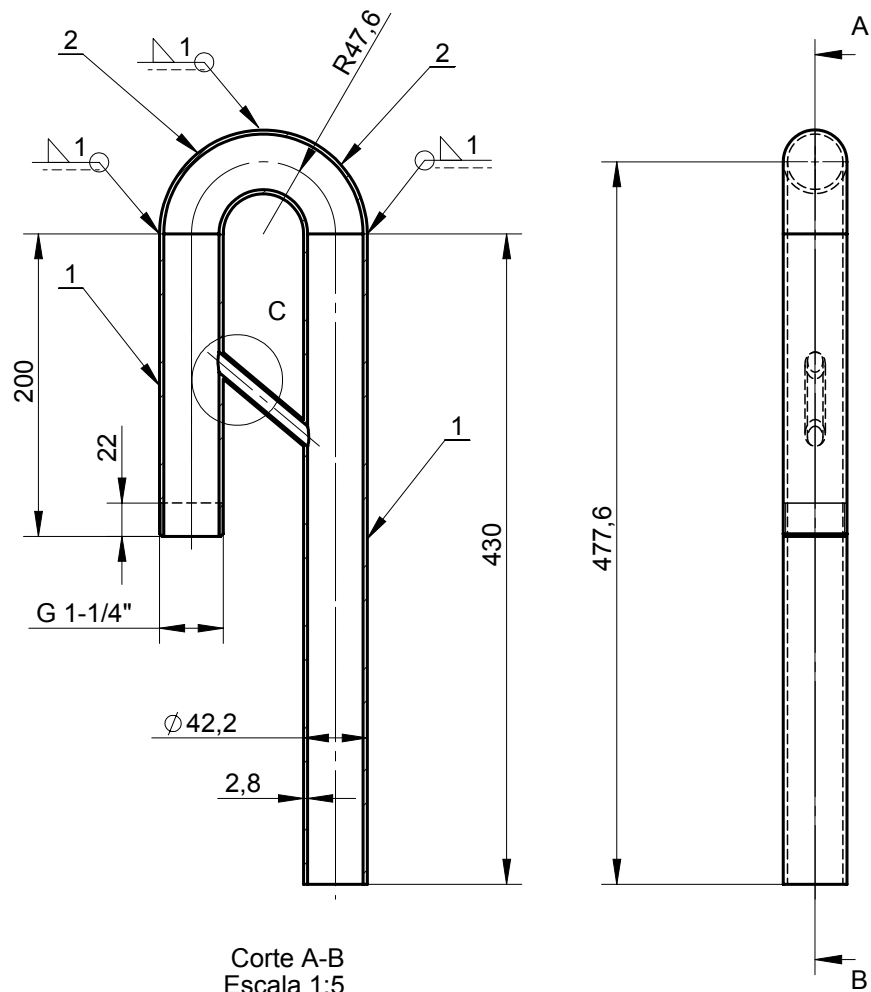
Nota: Cota com * sujeita a alterações. Ver comprimento da peça a produzir na lista de peças - observações

N10 Geral

1	Tubo sem costura 3/8"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304	1	Schedule 10S		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:2	For Instructional Use Only	Tubo 31	T_31
	NP265 Normal			

PROJ.		28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.		28-05-2018		
VISTO				

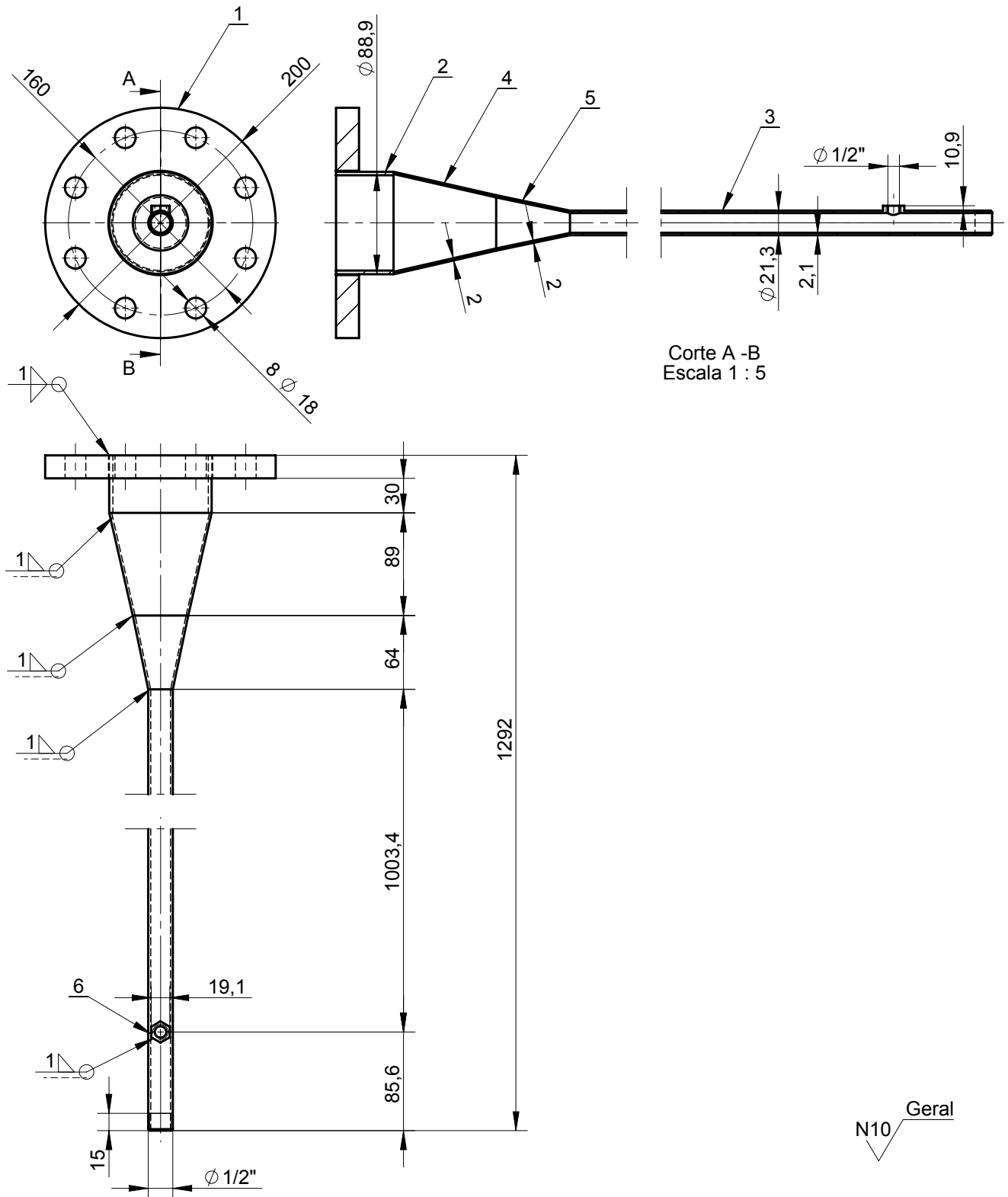


Pormenor C
Escala 2 : 5

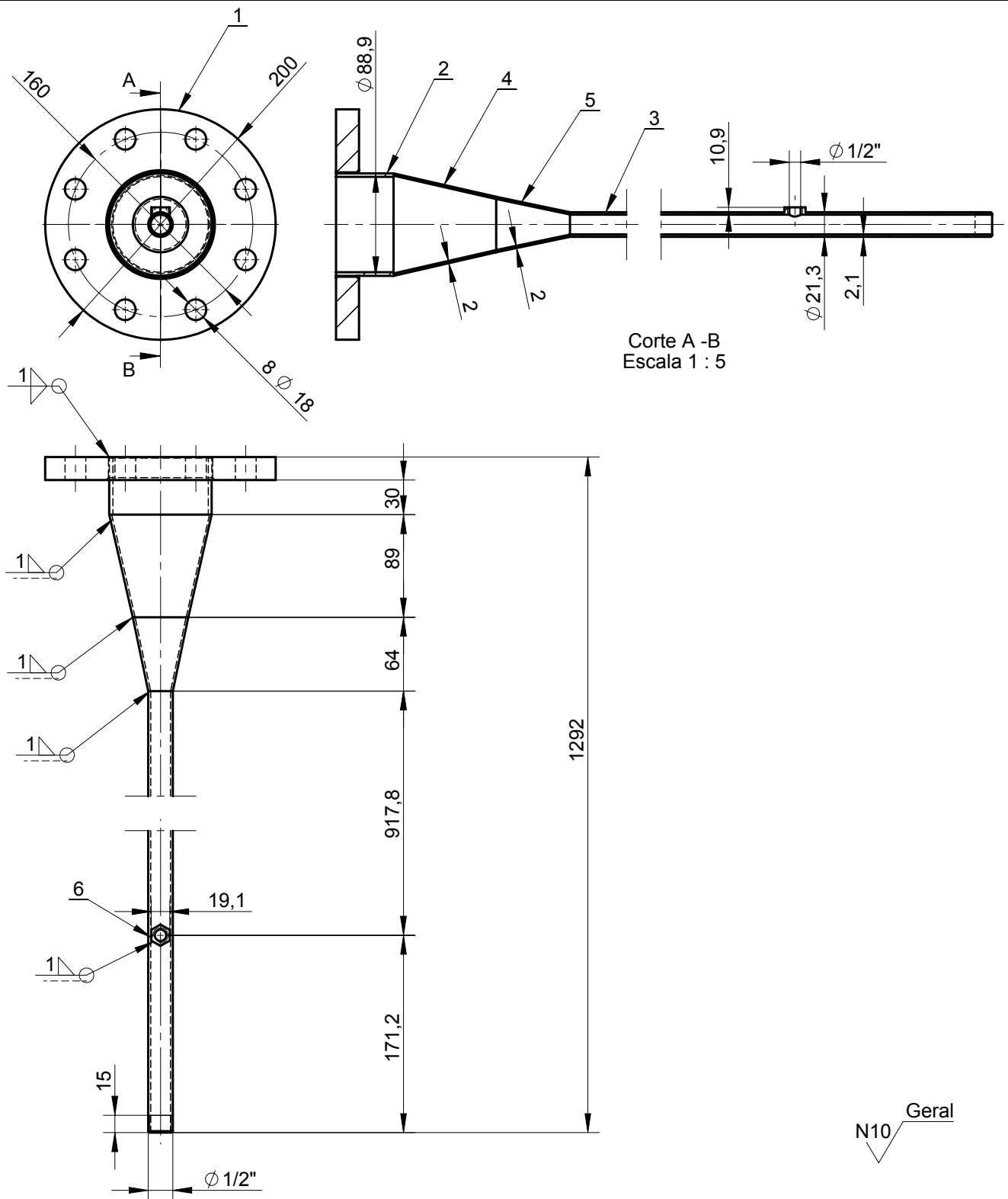
N10 ^{Geral}

1	Tubo sem costura 1/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
2	Curva 90° raio longo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304L	2	Schedule 10S	0,2	
2	Tubo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304	1	Schedule 10S		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

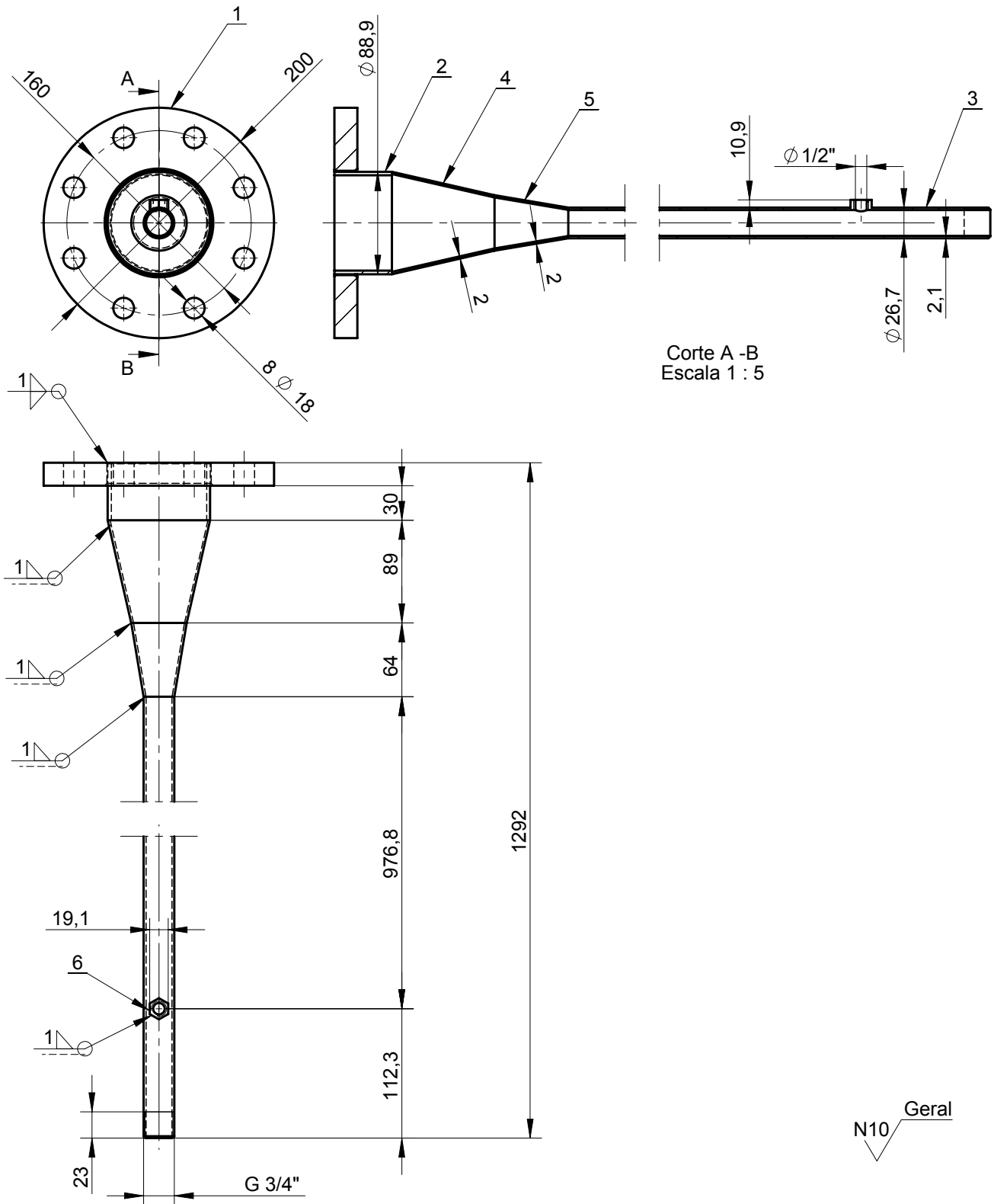
SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	Tubo 34	T_34
	NP265 Normal		



1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 40x20	ISO	AISI 304L	5		0,1	
1	Redução concêntrica DN 80x40	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 3/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

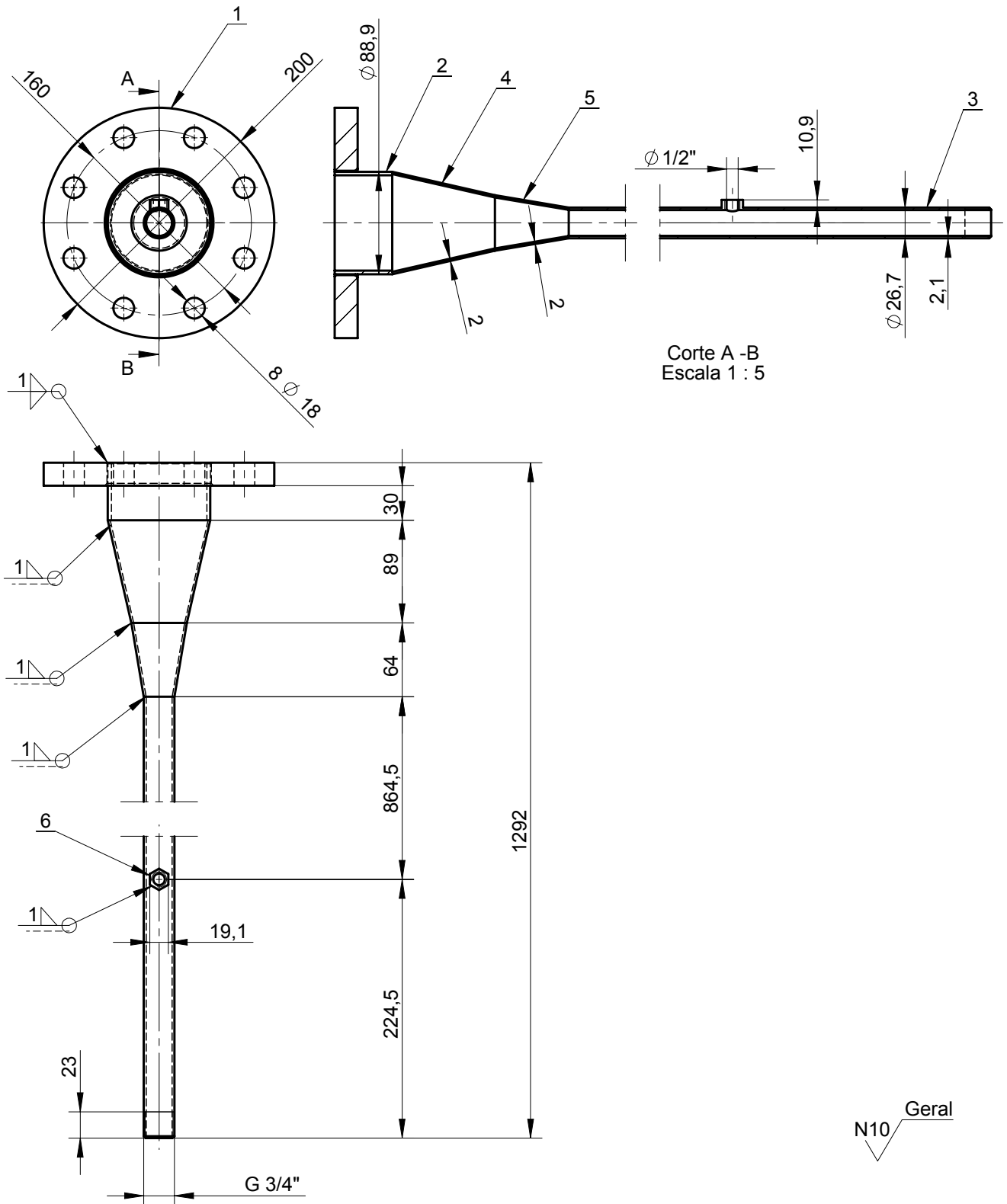


1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 40x20	ISO	AISI 304L	5		0,1	
1	Redução concêntrica DN 80x40	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 3/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES



1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 40x20	ISO	AISI 304L	5		0,1	
1	Redução concêntrica DN 80x40	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 3/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

PROJ.	28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.	28-05-2018		
VISTO			



N10 Geral

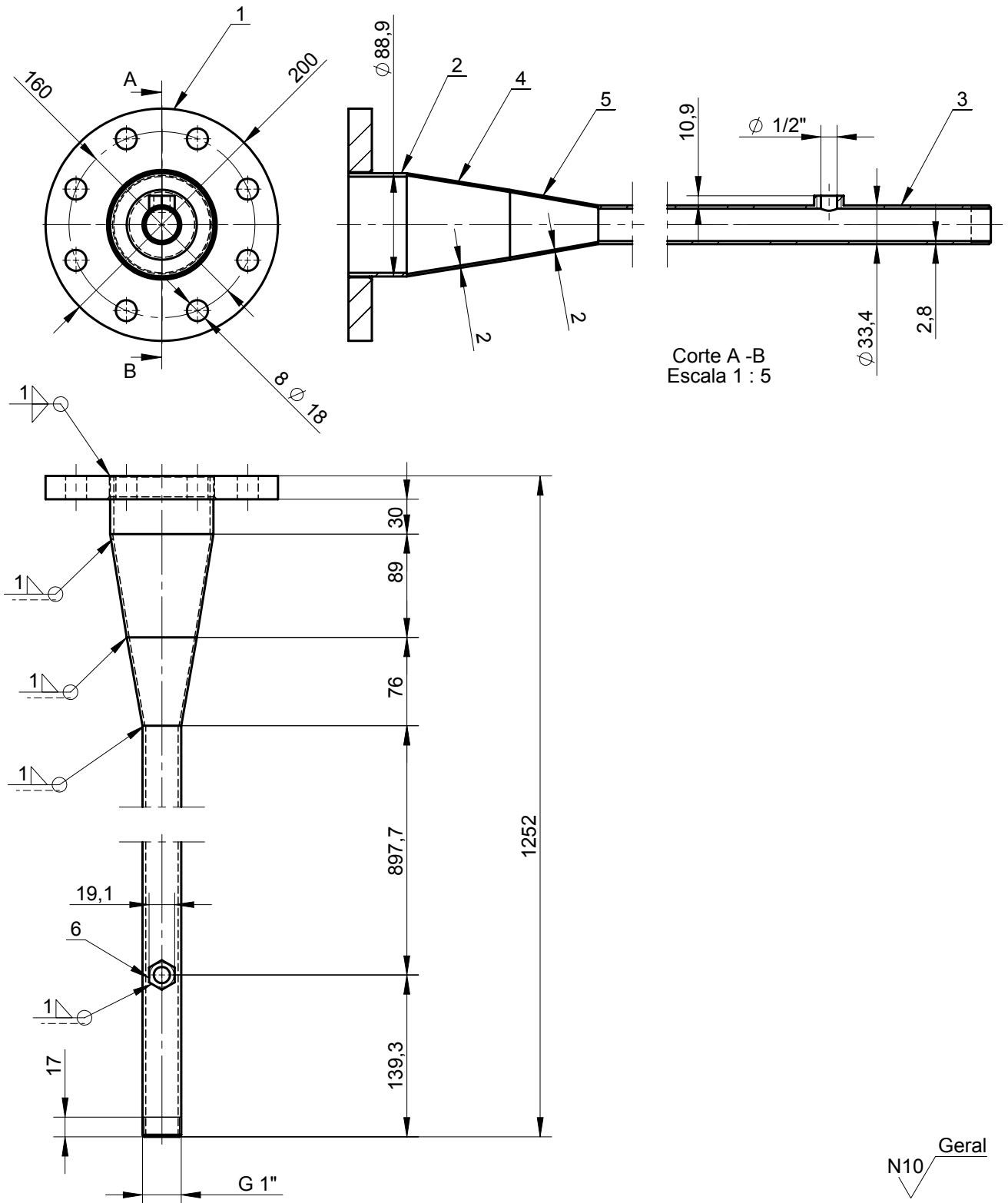
1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 40x20	ISO	AISI 304L	5		0,1	
1	Redução concêntrica DN 80x40	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 3/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 20 -2	T_8 20-2			
	NP265						
	Normal						

PROJ.		28-05-2018
DES.		28-05-2018
VISTO		

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



N10 Geral

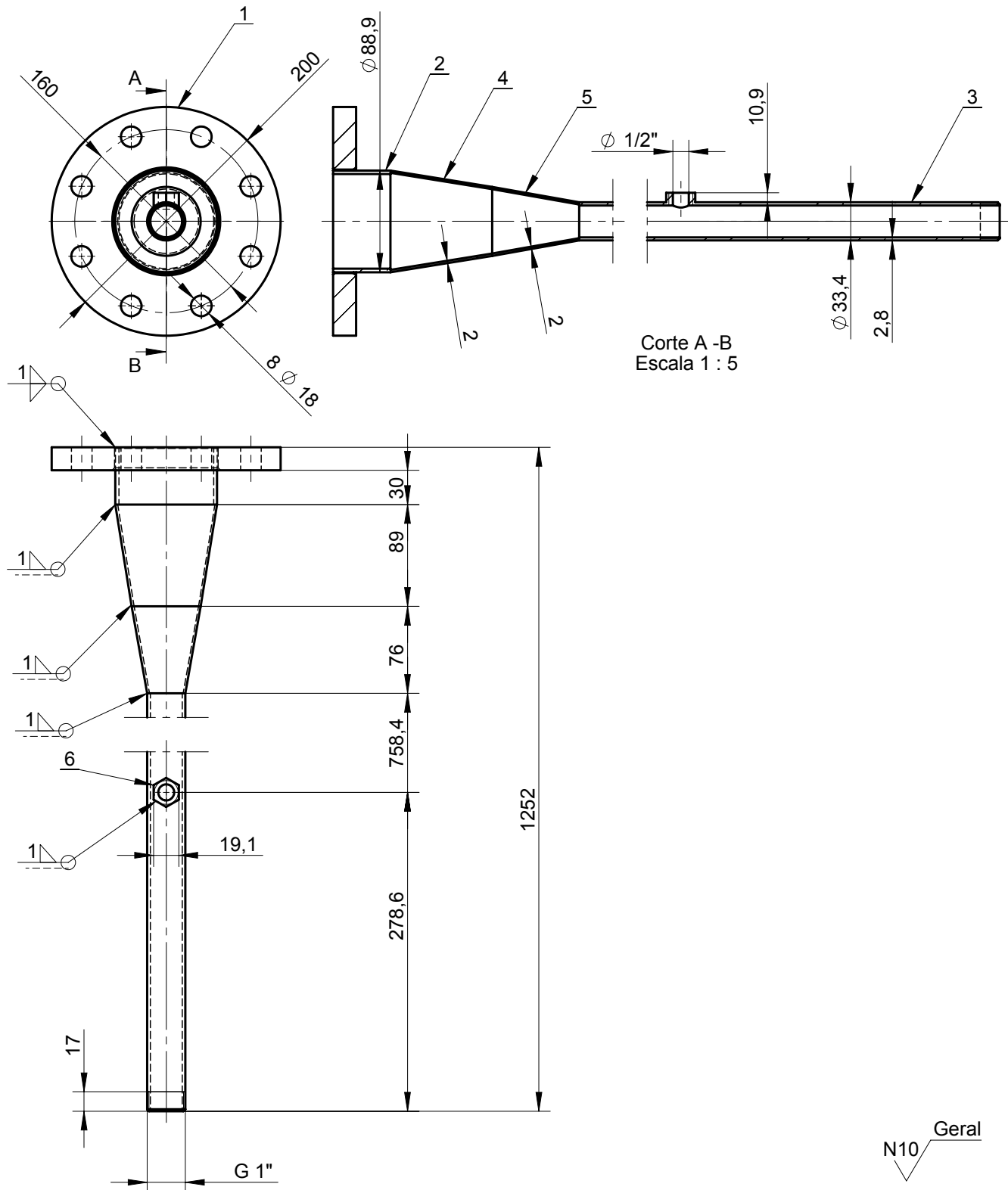
1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 50x25	ISO	AISI 304L	5		0,2	
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 1"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 25 -1	T_8 25-1
NP265 Normal				

PROJ.	28-05-2018
DES.	28-05-2018
VISTO	

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



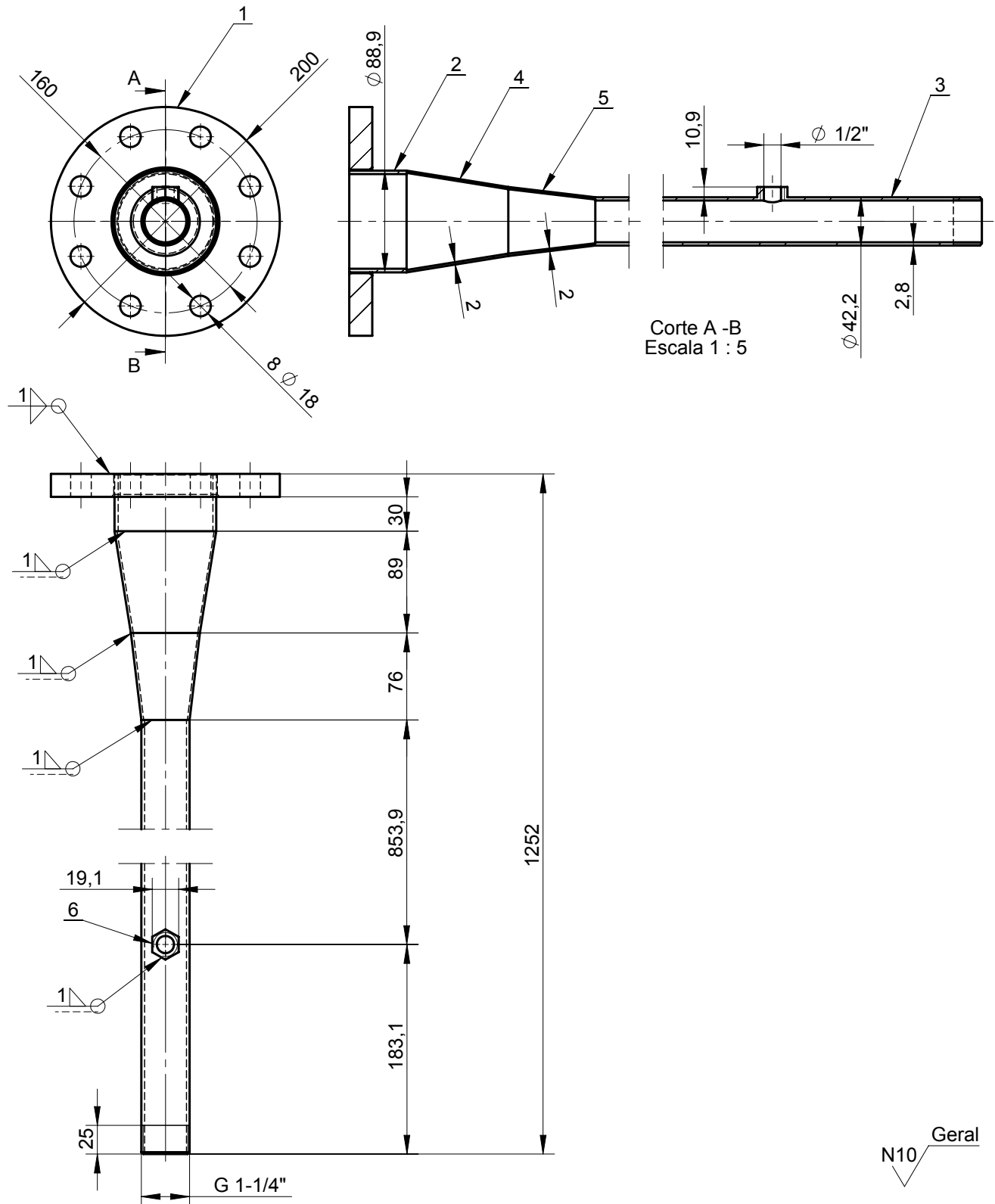
1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 50x25	ISO	AISI 304L	5		0,2	
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 1"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 25 -2	T_8 25-2
NP265 Normal				

PROJ.	28-05-2018
DES.	28-05-2018
VISTO	

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português
da Qualidade (IPQ)

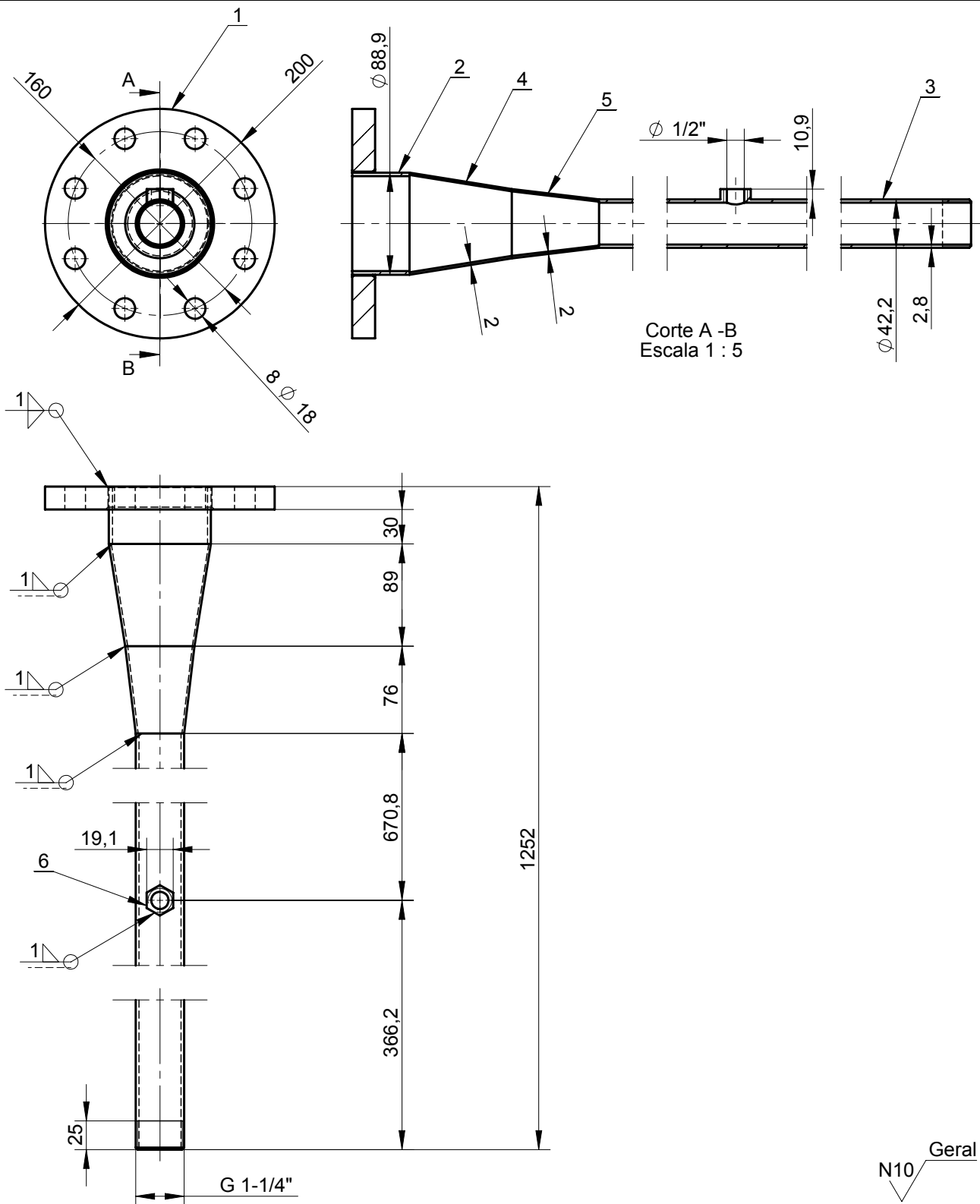


N10 Geral

1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 50x32	ISO	AISI 304L	5		0,2	
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 32 -1	T_8 32-1
NP265 Normal				

PROJ.	28-05-2018	FCT- UNL/ IPQ 2018 Projeto Banco de Ensaio	Instituto Português da Qualidade (IPQ)
DES.	28-05-2018		
VISTO			



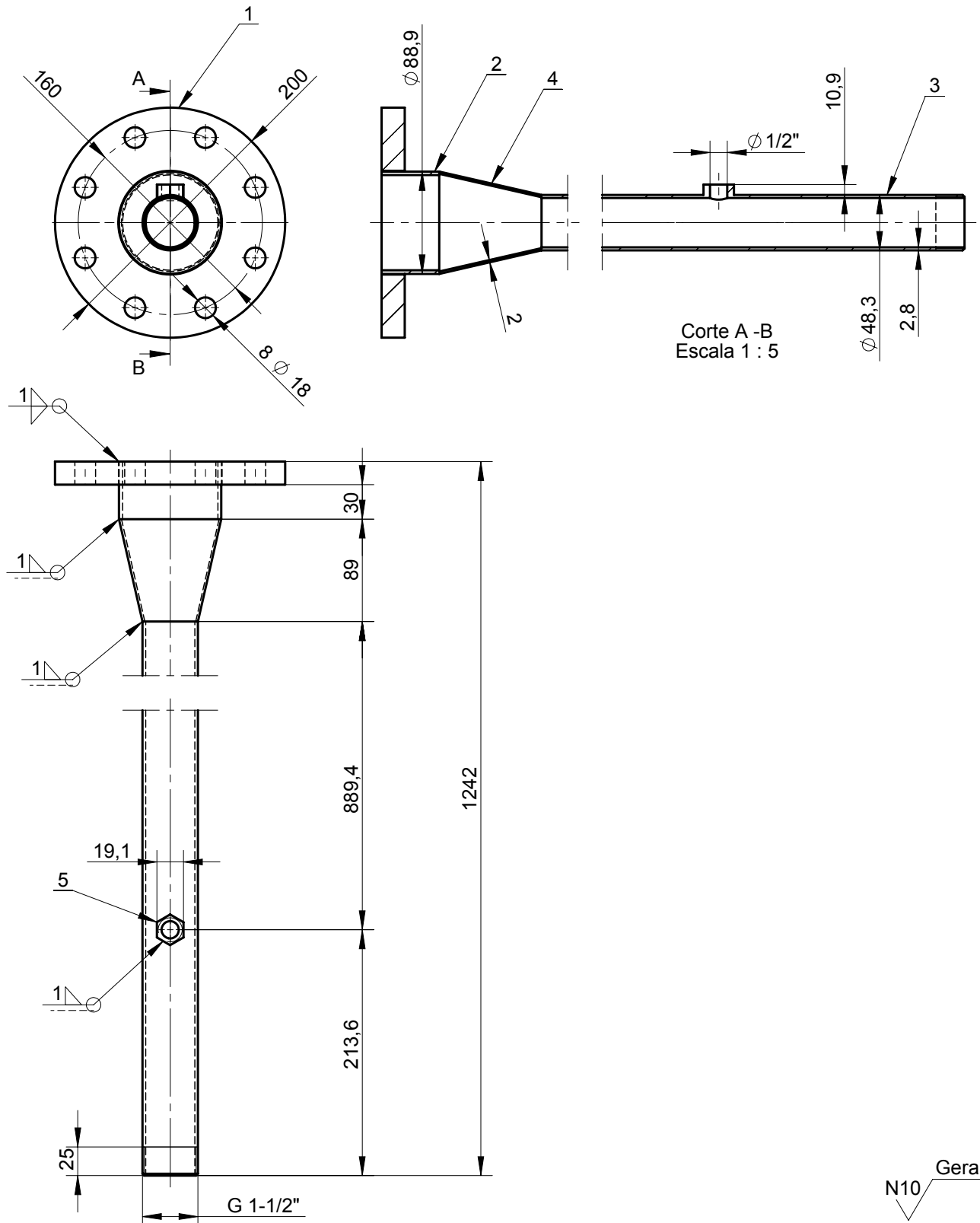
1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	6			
1	Redução concêntrica DN 50x32	ISO	AISI 304L	5		0,2	
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 1-1/4"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 32 -2	T_8 32-2
	NP265 Normal			

PROJ.	28-05-2018
DES.	28-05-2018
VISTO	

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

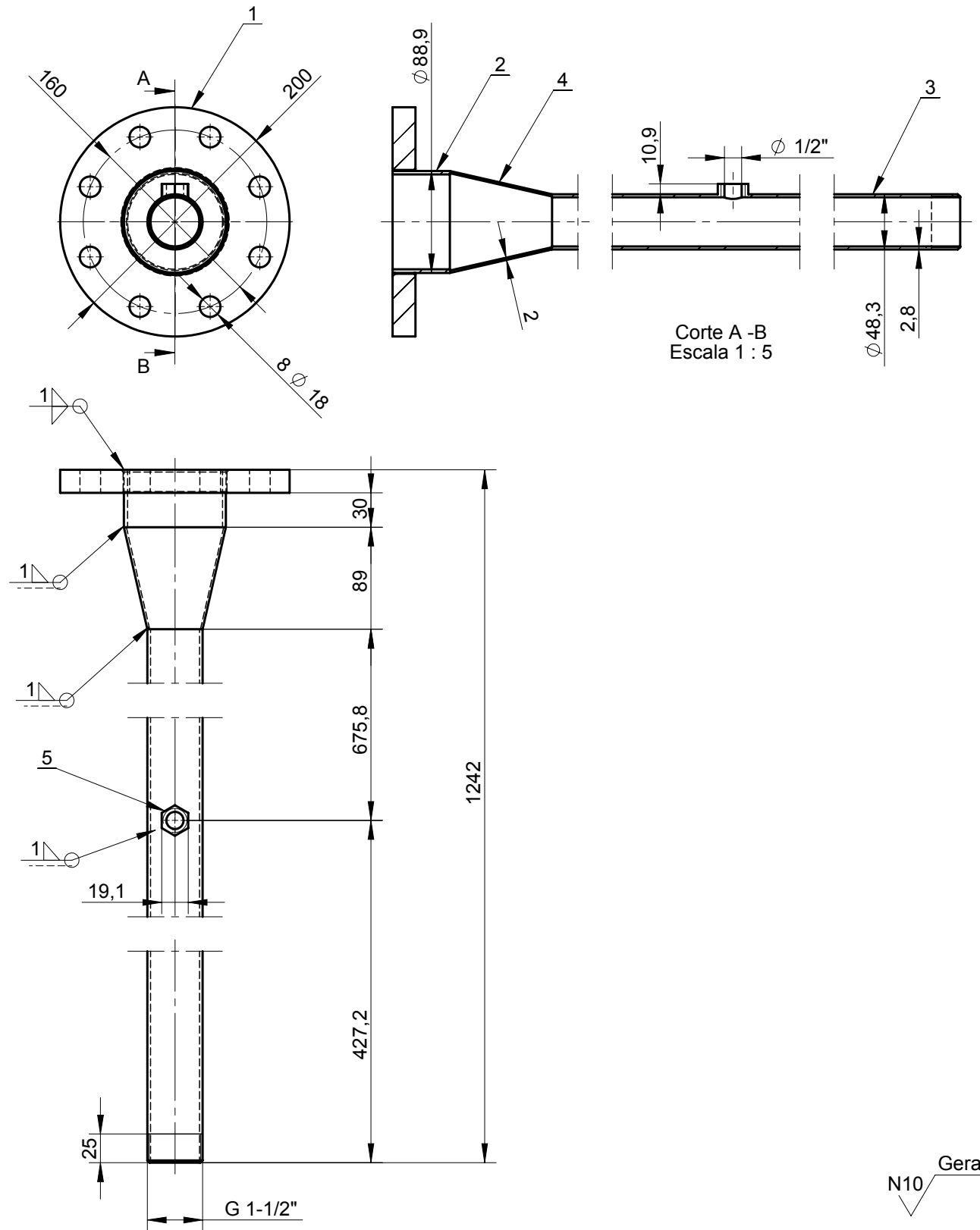
Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



N10 Geral

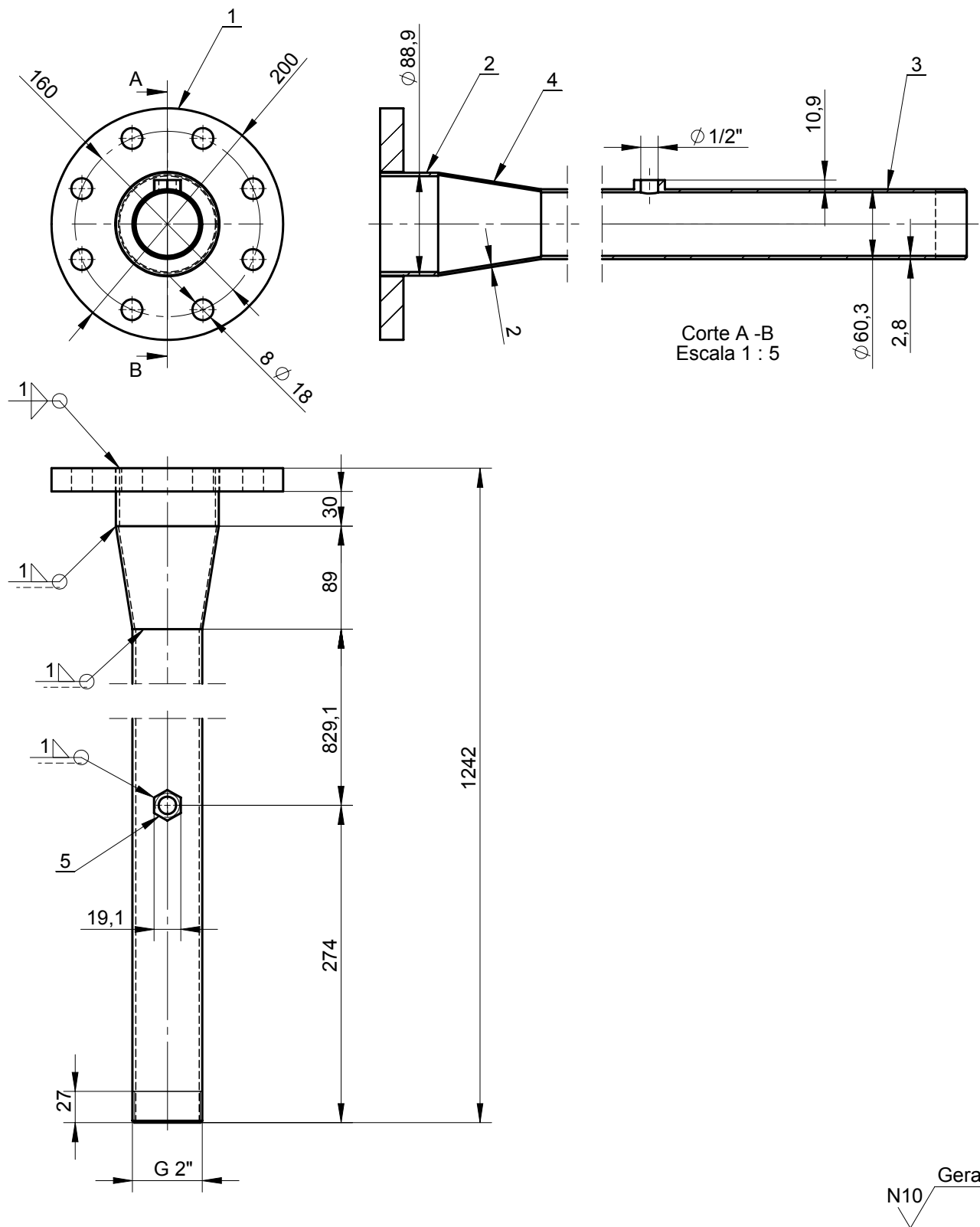
1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	5			
1	Redução concêntrica DN 80x40	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 1-1/2"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	Tubo 8- DN 40 -1	T_8 40-1
NP265 Normal				

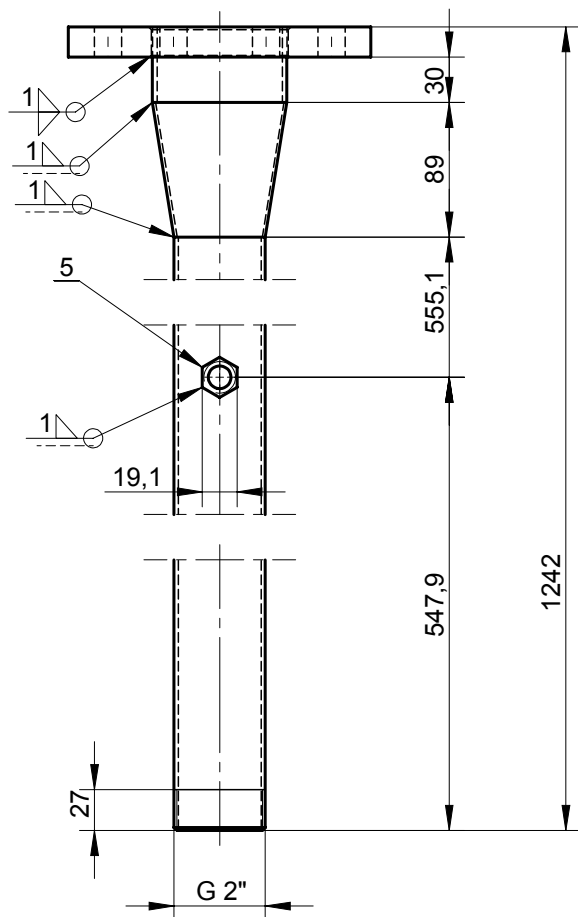
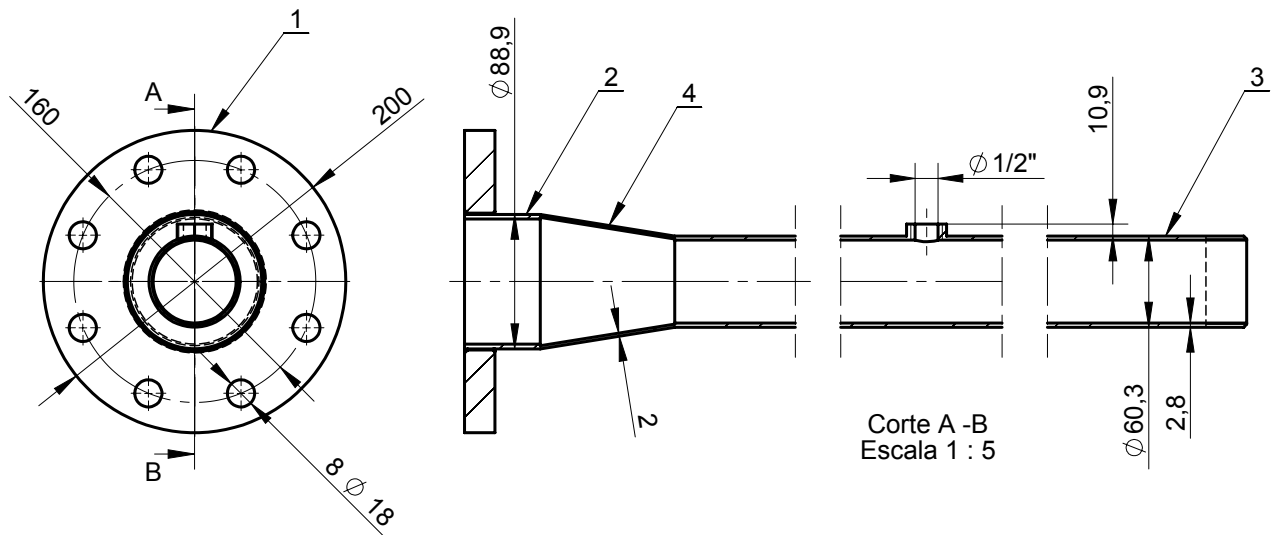


N10 Geral

1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	5			
1	Redução concêntrica DN 80x40	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 1-1/2"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

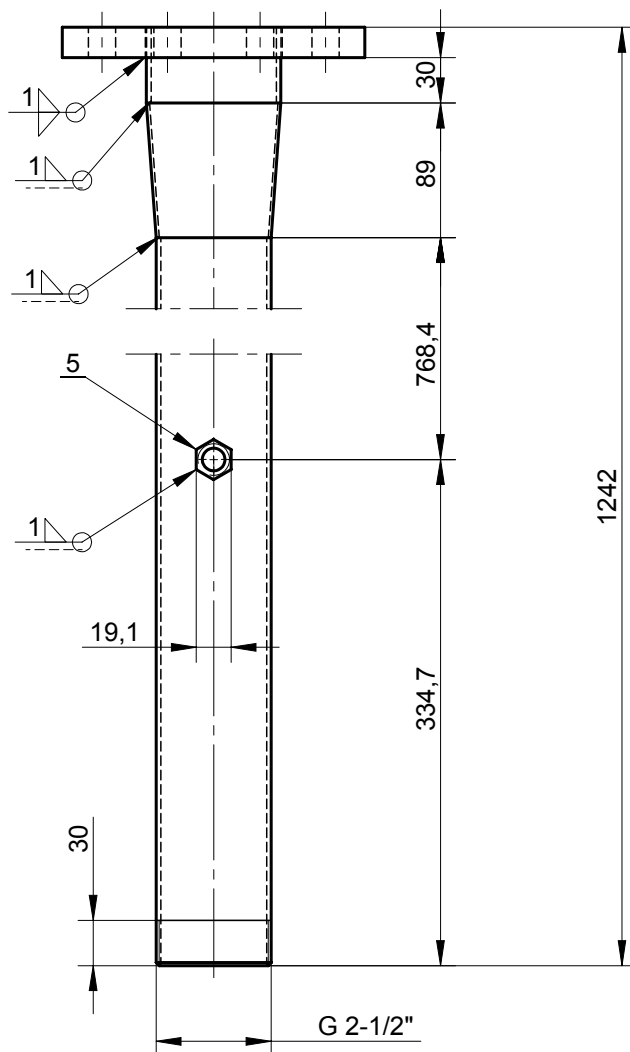
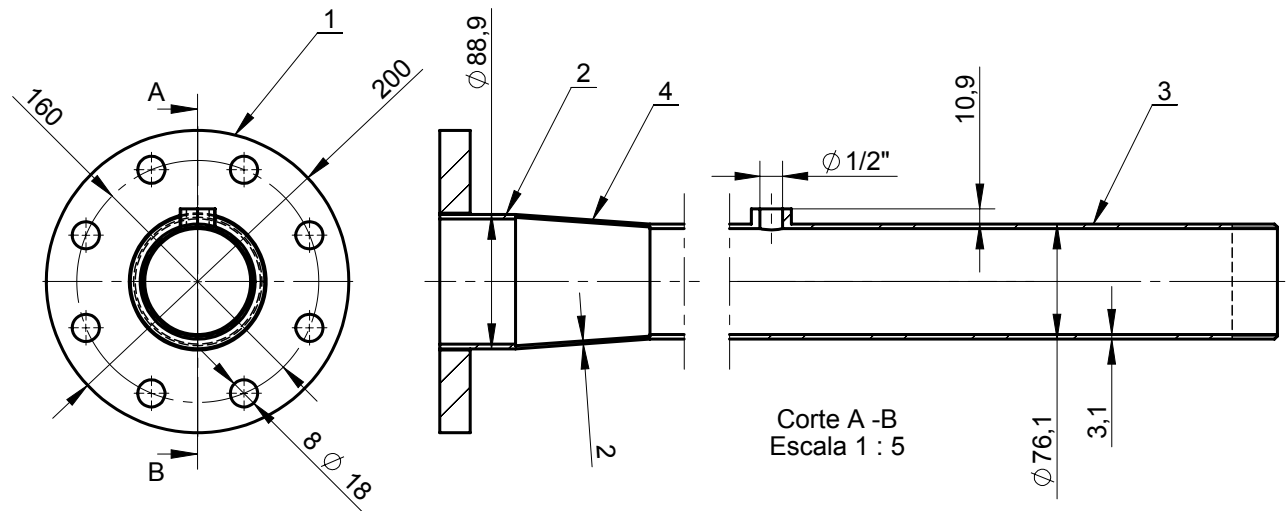


1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	5			
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 2"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES



N10 Geral

1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	5			
1	Redução concêntrica DN 80x50	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 2"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES



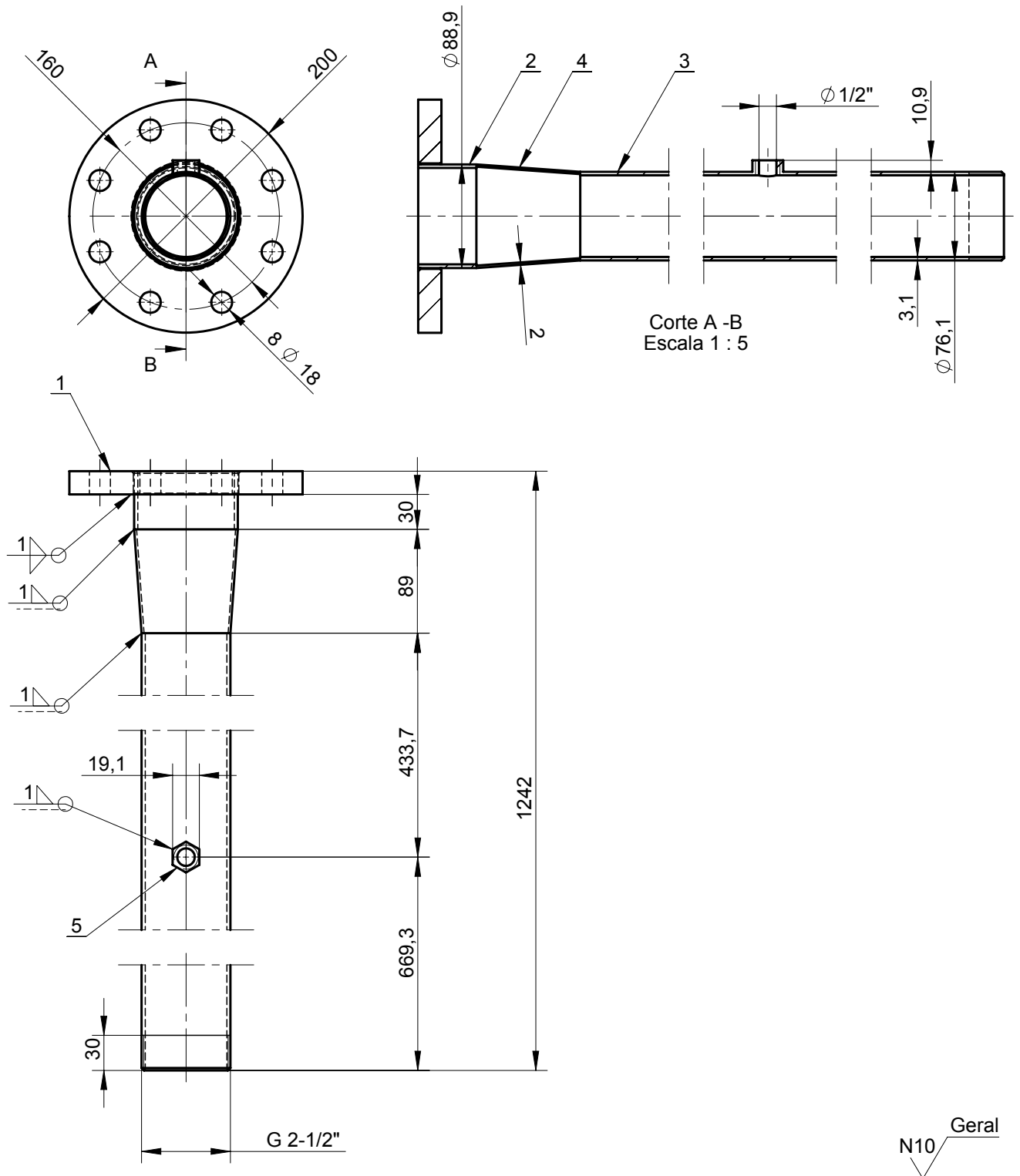
N10 Geral

1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	5			
1	Redução concêntrica DN 80x65	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 2-1/2"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

PROJ.	28-05-2018
DES.	28-05-2018
VISTO	

FCT- UNL/ IPQ 2018
Projeto Banco de
Ensaio

Instituto Português
da Qualidade (IPQ)



1	Porca sextavada 1/2"	ASME	AISI 304	5			
1	Redução concêntrica DN 80x65	ISO	AISI 304L	4		0,3	
1	Tubo sem costura 2-1/2"	ASTM	AISI 304	3	Schedule 10S		
1	Tubo sem costura 3"	ASTM	AISI 304	2	Schedule 10S		
1	Flange Plana EN1092 DN80	ISO DIN2576 PN16	AISI 304L	1		3,6	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

SOLIDWORKS Educational Edition	1:5	For Instructional Use Only	T_8 65-2
NP265 Normal		Tubo 8- DN 65 -2	